

# **TECNOLOGÍA WDM-POF PARA REDES DE COMUNICACIONES EN VEHÍCULOS**

**Iván Ruano Jiménez**

**Tutor: Beatriz Ortega Tamarit**

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2015-16

Valencia, 13 de Septiembre de 2016

## **Resumen**

En este trabajo se diseñará una red de comunicaciones en fibra óptica de plástico para su uso en los automóviles que introducirá, posteriormente, la tecnología WDM en este tipo de redes con el fin de obtener mejores prestaciones. En primer lugar, se hará un estudio del arte de las redes de fibra óptica de plástico en vehículos en la actualidad, con la finalidad de estimar los componentes utilizados, topologías, estándares y servicios que se prestan. Posteriormente, se realizará un diseño propio haciendo suposiciones razonables, tanto automovilísticas como tecnológicas, sobre los requisitos de este tipo de redes. Además se presentará un presupuesto acorde a los elementos utilizados en el sistema y teniendo en cuenta el estudio previo del mercado actual de los componentes. Una vez se haya realizado el diseño del sistema, se hará una propuesta del mismo que incluya tecnología WDM. Para ello, al igual que en el primer modelo, se llevará a cabo un estudio previo de las últimas investigaciones en sistemas WDM en fibras de plástico para incluir esta tecnología en el sistema del vehículo, con el fin de garantizar prestaciones avanzadas que serán evaluadas junto con el presupuesto de la misma. Por último, se realizará un análisis comparativo entre ambos sistemas en términos de presupuesto, prestaciones y consumo.

## **Resum**

En aquest treball es dissenyarà una xarxa de comunicacions en fibra òptica de plàstic per al seu ús en els automòbils que introduirà, posteriorment, la tecnologia WDM en aquest tipus de xarxes a fi d'obtenir millors prestacions. En primer lloc, es farà un estudi de l'art de les xarxes de fibra òptica de plàstic en vehicles en l'actualitat amb la finalitat d'estimar els components utilitzats, topologies, estàndars i servicis que es presten. Posteriorment es realitzarà un disseny propi fent suposicions raonables, tant automobilístiques com tecnològiques, sobre els requisits d'aquest tipus de xarxes. A més es presentarà un pressupost d'acord amb els elements utilitzats en el sistema tenint en compte l'estudi previ del mercat actual dels components. Una vegada s'haja realitzat el disseny del sistema, es farà una proposta del mateix que incloga tecnologia WDM. Per a això, al mateix que en el primer model, es durà a terme un estudi previ de les últimes investigacions en sistemes WDM en fibres de plàstic per a incloure esta tecnologia en el sistema del vehicle, a fi de garantir prestacions avançades que seran avaluades junt amb el pressupost de la mateixa. Finalment, es realitzarà una anàlisi comparatiu entre ambdós sistemes en termes de pressupost, prestacions i consum.

## **Abstract**

In this work a communications network will be designed in plastic optical fiber for its use in automobiles that will introduce, later, WDM technology in this type of networks in order to obtain better services. First of all, there will be done a study of the art of plastic optical fiber networks in vehicles at present, for the purpose of estimating the used components, topology, standards and services that are lent. Later, a proper design will be realized doing reasonable car and technological assumptions, on the requisites of this type of networks. Also a budget will be done according to the elements used in the system and bearing in mind the previous study of current components market. Once the design of the system has been realized, there will be done a proposal including WDM technology. For it, as in the first model, there will be carried out a previous study of last investigations in WDM systems in plastic fibers to include this technology in the system of the vehicle, in order to guarantee advanced services that will be evaluated together with the budget of the same one. Finally, a comparative analysis will be realized between both systems in terms of budget, services and consumption.

# Índice

Capítulo 1.	Introducción .....	4
1.1	Motivación .....	4
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Estructura de la memoria.....	5
1.4	Planificación temporal.....	5
Capítulo 2.	Redes de comunicaciones en vehículos basadas en fibras ópticas de plástico .....	7
2.1	Estado del arte actual.....	7
2.2	Fibras ópticas de polímero .....	9
2.2.1	Fibras PCS.....	9
2.2.2	Fibras PMMA.....	10
2.3	Redes ópticas en aeronaves .....	12
2.4	Sistema MOST .....	13
2.4.1	Introducción .....	13
2.4.2	Unidades de control/Nodos .....	14
2.4.3	Unidad de transmisión y recepción.....	15
2.4.4	Conectores .....	16
2.4.5	Formatos de modulación .....	17
2.4.6	Requisitos ópticos del sistema MOST .....	18
2.5	Fuentes ópticas .....	20
2.5.1	LED.....	20
2.5.2	Diodo láser .....	21
2.6	Receptores .....	22
2.7	Aplicaciones y requisitos .....	23
2.7.1	Vídeo .....	24
2.7.2	Audio .....	24
2.7.3	Ethernet.....	25
Capítulo 3.	Diseño de la red óptica monocanal en vehículos.....	26
3.1	Especificaciones de servicios y vehículo .....	26
3.2	Componentes en el mercado .....	28
3.2.1	Transceptores.....	28
3.2.2	Fibra óptica.....	28
3.2.3	Microcontrolador .....	29

3.3	Selección de componentes .....	30
3.4	Funcionamiento y evaluación.....	33
3.4.1	Descripción del sistema.....	33
3.4.2	Funcionamiento .....	33
3.4.3	Evaluación .....	34
3.4.4	Prestaciones .....	35
3.4.5	Presupuesto.....	35
3.4.6	Consumo de potencia.....	36
3.4.7	Conclusiones.....	36
Capítulo 4.	Propuesta de sistema WDM para vehículos.....	37
4.1	Introducción .....	37
4.2	Canales en DWDM, CWDM y sistemas con SI-POF.....	38
4.3	Demultiplexación de la señal WDM .....	40
4.4	Estado actual de los sistemas WDM-POF.....	42
4.5	Planificación multifrecuencia .....	42
4.6	Componentes en el mercado .....	43
4.6.1	Láseres.....	43
4.6.2	Fotodiodos.....	44
4.6.3	Circuladores.....	44
4.6.4	Acoplador .....	44
4.6.5	Red difracción de Bragg.....	44
4.6.6	Fibra óptica.....	49
4.7	Descripción y evaluación del diseño .....	49
4.7.1	Topología.....	49
4.7.2	Balance de potencia y prestaciones .....	50
4.7.3	Presupuesto.....	51
4.7.4	Consumo de potencia.....	53
4.8	Comparativa de diseños .....	54
Capítulo 5.	Conclusiones y líneas futuras .....	56
Referencias	.....	59
Anexos	.....	61
Anexo 1	Transceptor AFBR-59F2Z.....	61
Anexo 2	Fibra óptica ESKA GHCP4001.....	64
Anexo 3	Microcontrolador OS81118.....	65
Anexo 4	Láser PL-450B .....	66
Anexo 5	Láser PLT5-488 .....	68

Anexo 6 Láser PL-520 .....	69
Anexo 7 Fotodiodo MTD5052W.....	71
Anexo 8 Fotodiodo S7797 .....	72
Anexo 9 Balance de potencia sistema WDM .....	73

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Desde hace muchos años, las fibras ópticas de plástico (POF) se han venido utilizando en numerosas aplicaciones como en señalización, en iluminación, en decoración o en tareas industriales, pero en los últimos tiempos se ha descubierto el gran potencial que tiene como medio de transmisión óptico de datos dada su fácil y económica instalación, el elevado ancho de banda disponible, la inmunidad al ruido eléctrico y su flexibilidad, entre otras propiedades, que hacen pensar en las POF como una excelente alternativa en redes de comunicación de datos o redes residenciales y comerciales. Además, su uso en el sector de la automoción se ha ido incrementando exponencial desde que en 2001 se expusieron los primeros coches BMW con sistema POF para aplicaciones multimedia dentro del automóvil, reduciendo en decenas de kilogramos el peso del automóvil con el simple cambio de medio de transmisión de comunicaciones.

Actualmente existen diferentes estándares que utilizan fibra de plástico en automóviles, según el servicio que se preste, pero el más extendido se trata del estándar MOST, un protocolo de bus de datos que utiliza POF para la transmisión de datos, vídeo y audio en los vehículos y que prácticamente se está utilizando en la mayoría de coches de gama media-alta.

Las ventajas que proporciona el uso de fibras de plástico en los sistemas de comunicaciones de datos está haciendo que se contemple el uso de estas en sectores como la medicina, la aeronáutica o redes domésticas, las cuales tienen en común que necesitan una tasa de transmisión elevada. Además, el hecho de que la tecnología avance rápidamente y los sistemas electrónicos más comunes necesiten cada vez mayores tasas de transmisión, hace que se tenga que buscar soluciones para adaptar las redes POF a estos requerimientos. La solución es la utilización de tecnología WDM, ampliamente utilizada en sistemas alrededor de 1550 nm y que ahora se tendrá que contemplar para sistemas en longitudes de onda visible, debido a las ventanas de pérdidas que presentan las fibras de polímero, y aumentando el ancho de banda de los sistemas POF mediante la utilización de diferentes longitudes de onda.

## 1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de fin de Grado es proponer un sistema WDM-POF que mejore las prestaciones de los actuales sistemas de fibra óptica de plástico (POF) en los automóviles. Para ello, se realizará un estudio completo tanto de los sistemas actuales como de la tecnología WDM-POF, lo cual permitirá compararlos siguiendo determinados criterios.

Este objetivo general se puede desglosar en los siguientes puntos:

- Realizar un estudio actual de los sistemas de fibra óptica de plástico.
- Diseñar un sistema POF monocal para satisfacer las necesidades de ocio y conectividad en el automóvil.
- Desarrollar un presupuesto en base a los componentes utilizados en el sistema.
- Aplicar la tecnología WDM al sistema diseñado, con las modificaciones que conlleve a partir del diseño de partida.
- Realizar un presupuesto para el nuevo diseño teniendo en cuenta los nuevos componentes del sistema.
- Establecer una comparativa entre ambos sistemas en términos de presupuesto, prestaciones y consumo.

### 1.3. Estructura de la memoria

En el capítulo 2, en primer lugar, se va a realizar un estudio del arte actual de las redes de fibra óptica de plástico y se va a conocer el estándar más implementado. A continuación, se analizará las propiedades básicas de las fibras de plástico, destacando las ventajas y desventajas de su uso. Además, se realizará también un estudio del resto de componentes necesarios para realizar un diseño óptico de estas características.

A continuación, se estudiará el tipo de modulaciones que se pueden utilizar para el primer diseño y se analizará las necesidades en cuanto a prestaciones de las aplicaciones a implementar en el vehículo. Por último en cuanto al estudio de las redes actuales, se realizará una pequeña introducción de los sistemas de fibra óptica de plástico en aplicaciones aeronáuticas, donde supone un gran avance en lo que a seguridad se refiere.

Después de haber realizado un estudio del arte actual, en el capítulo 3, se procederá a diseñar un sistema propio que cumpla con las necesidades básicas de las aplicaciones típicas de entretenimiento y conectividad en el vehículo, definiendo su topología, así como los componentes que formarán el sistema óptico. Una vez que se ha definido el sistema y se ha evaluado su viabilidad, se realizará un presupuesto y un estudio de prestaciones y consumo.

Una vez diseñado el primer sistema y estudiado cuáles son sus ventajas y desventajas, en el capítulo 4 se procederá al diseño de un sistema WDM con el fin de dotar al automóvil de un sistema con mayores prestaciones. Para ello habrá que realizar un estudio de la topología del sistema a implementar, así como un presupuesto y análisis de prestaciones y consumo.

Por último, se realizará una comparativa entre ambos diseños para ver en qué aspectos son mejores cada uno de los diseños.

### 1.4. Planificación temporal

Este proyecto ha tenido una duración total de 9 meses, a lo largo de los cuales se han distribuido las tareas como se puede ver en el cronograma que se muestra a continuación:

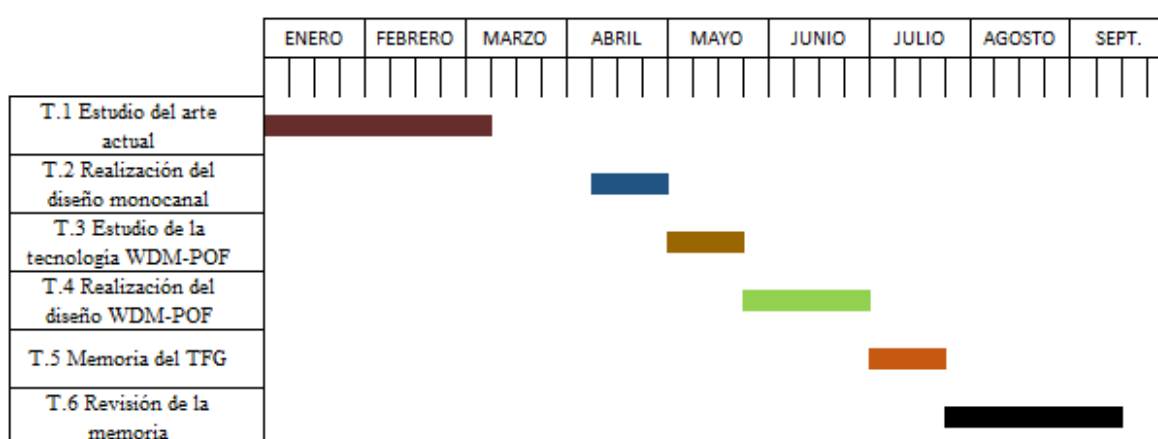


Tabla 1.1: Cronograma del trabajo

<b>Tarea</b>	Estudio del arte actual	Realización del diseño 1	Estudio de la tecnología WDM en POF	Realización del diseño WDM	Memoria del TFG	Revisión de la memoria
<b>Duración</b>	18 de Enero-4 de Marzo	11 de Abril-25 de Abril	2 de Mayo-16 de Mayo	23 de Mayo-29 de Junio	4 de Julio-24 de Julio	25 de Julio-11 de Septiembre

*Tabla 1.2: Fechas de planificación*



## Capítulo 2. Redes de comunicaciones en vehículos basadas en fibras ópticas de plástico

### 2.1. Estado del arte actual

Durante muchos años, los automóviles han estado basados únicamente en estructuras mecánicas que carecían de módulos electrónicos, pero esto ha ido cambiando durante el paso del tiempo con la introducción de componentes eléctricos y electrónicos, por ejemplo, para cubrir funciones del motor o de seguridad en el automóvil. Este hecho hizo contemplar la introducción de enlaces ópticos y buses de datos en los diferentes sistemas del automóvil.

En los inicios de los buses de datos en los automóviles, el primero en ser patentado por Robert Bosch en 1892 fue el protocolo CAN (Controller Area Network) bus y que se caracterizaba por tener un único canal de comunicaciones que consistía en un par de cables trenzados y que permitía una velocidad de transmisión desde 125 a 500kbit/s. Este sistema redujo bastantes los costes y redujo el cableado a un solo par.

En 1998, Mercedes Benz introdujo satisfactoriamente por primera vez un sistema óptico de bus de datos (D<sup>2</sup>B) que se basaba en fibra óptica de polímero y LED, que se utilizaba para transmitir información e interconectar los dispositivos usados para el entretenimiento entre los pasajeros. El bus digital doméstico (D<sup>2</sup>B) introducido por Mercedes Benz se basaba en una topología de bus en anillo, utilizando fibras de polímero (POF) de 1 mm de diámetro de núcleo y LEDs rojos, consiguiendo una tasa de transmisión de datos de 5.6 Mb/s que permitía transmitir audio y realizar funciones de control de datos para teléfonos móviles o sistemas de reconocimiento de voz.

Por el año 2000, un consorcio liderado por Motorola y en el que se unieron Audi, BMW, Volvo o Volkswagen, crearon el protocolo LIN (Local Interconnect Network) bus que en realidad se trataba de una subred local de la red CAN y que cablea los diferentes componentes de un sistema, siendo la estructura de tipo Maestro-Esclavo utilizando cable de cobre y con una velocidad de transmisión de entre 9.6 y 19.2 Kbps.

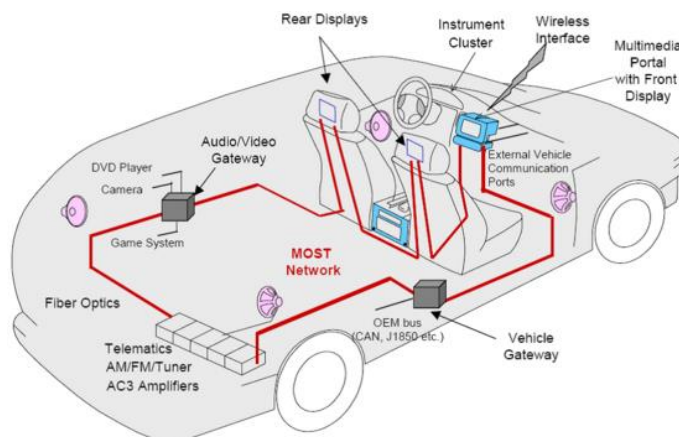
Más tarde, en 2002, apareció el sistema MOST (Media Oriented Systems Transport), que fue creado por MOST Cooperation y que se trata de una asociación de fabricantes de coches, arquitectos de sistemas y proveedores de componentes, que juntos buscaron definir un sistema de redes multimedia y un modelo de aplicación común. MOST25 utilizaba prácticamente la misma capa física que las redes D<sup>2</sup>B pero con una tasa de transmisión de 22.6 Mb/s que permitía la transmisión de vídeos comprimidos. Además la topología más utilizada era en anillo, aunque también existían topologías en forma de estrella y doble anillo para aplicaciones más críticas.

Las funciones de entretenimiento y navegación cubren una gran parte de la utilidad de las redes POF en los automóviles, pero no son las únicas. BMW en colaboración con numerosos proveedores electrónicos, desarrollaron un protocolo llamado ByteFlight, que hace las funciones de soporte del gran número de sensores, airbags y unidades de control electrónicas que se encuentran dentro del automóvil. Al contrario que MOST, donde se trabaja con transferencia de datos en tiempo real, ByteFlight es un sistema determinista donde la clave del sistema está en que ningún tipo de información se pierda, algo vital en los sistemas de seguridad. Además, se utiliza una topología en estrella activa con un acoplador central. Este sistema se puede considerar el predecesor del sistema FlexRay, aunque este sistema es más utilizado en su versión coaxial.

En la actualidad, el sistema MOST sigue siendo ampliamente implementado en el mundo del automovilismo, y numerosos modelos de automóviles incorporan MOST en la actualidad: Mercedes clase-E y clase-S, BMW serie 7, Porsche Cayenne o Audi A8, entre otros. Por ejemplo, en 2012, Audi continuó con la tradición de MOST implementando el estándar MOST150 que utiliza una topología en anillo que alcanza los 150 Mb/s y que abre aún más las el abanico de posibles usos de los diferentes componentes utilizados, habilitando al coche para el uso de Ethernet, por ejemplo, utilizando las fibras

POF y LEDs. Esta mejora en la tasa de transmisión se consiguió con la mejora del transmisor y receptor así como los drivers del LED y los controladores de red.

Un ejemplo de sistema óptico para aplicaciones de ocio dentro del automóvil se puede observar en la Figura 2.1, donde se puede ver la conexión mediante fibra de algunos dispositivos como altavoces, pantallas o reproductor DVD.



**Figura 2.1: Sistema óptico para aplicaciones de ocio en el automóvil**

Aunque actualmente los buses de datos ópticos basados en las fibras de plástico de 1mm de diámetro, en el rango de la longitud de onda visible de color rojo, son la tecnología más eficiente en lo que a coste se refiere para enlaces punto a punto dentro del coche, debido a la mayor demanda de requisitos en las redes de vehículos, se está investigando nuevas tecnologías de transmisión para la capa física. Las principales limitaciones operacionales del sistema PMMA/LED son el margen del sistema (unos 13 dB), el rango de temperatura limitado a 85°C y la tasa de transmisión (100 a 200 Mb/s). Una solución para estas limitaciones es el uso de fibras PCS (Polymer Clad Silica), las cuales tienen un núcleo de silicio de 100 a 1500  $\mu\text{m}$  de diámetro y una cubierta de polímero de menor índice.

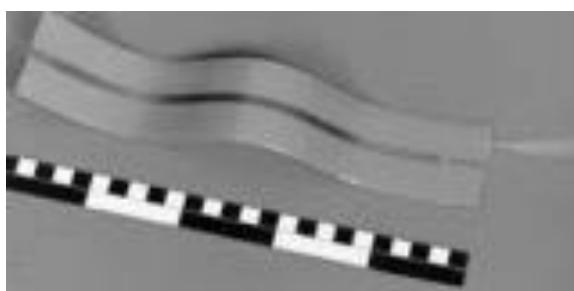
Las PCS se distinguen por su baja atenuación, además de tener una resistencia a la temperatura de hasta 125°C. Teniendo un diámetro habitual de 200  $\mu\text{m}$ , las fibras tienen menor radio de curvatura que aumenta hasta los 20 años el ciclo de vida de estas. Además en combinación con los VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) el margen del sistema y el ancho de banda se ven ampliados con respecto a las fibras de polímero. En la actualidad, el uso de los sistemas PCS-VCSEL es más limitado en los coches por su tolerancia mecánica en los componentes y su mayor coste, pero son la base para el futuro para las demandas de tasa de transmisión o margen de potencia que se elevarán tanto que los sistemas LED-POF llegarán a sus límites físicos.

Por último, cabe remarcar que debido al incremento del número de dispositivos, el número de enlaces y por tanto de cables se ha visto aumentado, haciendo el sistema cada vez más complejo, pesado y voluminoso. Además, la instalación y fabricación de los cables se hace de manera manual en muchas partes por tanto es importante buscar una solución que facilite la instalación y que reduzca el volumen del sistema. Es aquí donde es importante resaltar la tecnología de FFCs (flat flexible cables) y los FPCs (flat printed circuits).

Por lo que respecta a la tecnología FFC, sólo se está utilizando en líneas de alta tensión y transmisión de señales de reloj, pero ya se está investigando la integración de fibras PCS en FFCs sin pérdida en las propiedades esenciales de la fibra y serán una gran evolución en la eficiencia de integración de la fibra óptica en los automóviles. Los FPCs también serán importantes en lo que respecta a la transmisión de datos en distancias cortas, donde ya se está evolucionando en la realización de guías de onda impresas en diferentes sustratos como vidrio, metal o polímeros. Podemos observar un ejemplo de estas tecnologías en las figuras 2.2 y 2.3 [1]:



*Figura 2.2: FFC con integración de fibra óptica*



*Figura 2.3: Guía de onda óptica plana en un sustrato flexible*

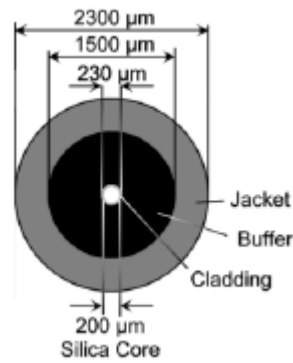
## **2.2. Fibras ópticas de polímero**

Las fibras ópticas han sido utilizadas habitualmente, a lo largo del tiempo, para aplicaciones con una alta tasa de transmisión de datos debido a que no produce radiación interferente y es insensible a las interferencias electromagnéticas. Además, en comparación con los cables blindados tradicionales, las fibras ópticas son más ligeras y flexibles y se pueden utilizar más fácilmente. Dos tipos de fibra óptica de plástico muy utilizadas son las fibras PCS y las fibras PMMA.

### **2.2.1. Fibras PCS**

Por lo que respecta a las PCS (Polymer Clad Silica), son fibras con núcleos desde 100 a 1500  $\mu\text{m}$  y apertura numérica de hasta 0.48. El núcleo típico en aplicaciones para transmisión de datos es de 200  $\mu\text{m}$  de fibra de vidrio recubierto por una cubierta de polímero y que se caracterizan por su baja atenuación en comparación con las fibras PMMA y por tener una resistencia a la temperatura de hasta 125°C. Además, el diámetro de 200  $\mu\text{m}$  permite radios de curvatura pequeños que aumentan la vida de la fibra hasta los 20 años. Haciendo referencia a la estructura del cable, que se puede observar en la Figura 2.4, el núcleo de sílice está rodeado de una cubierta típica de polímero de 15  $\mu\text{m}$  y cubierto por un buffer negro de unos 1500  $\mu\text{m}$  que facilita el ensamblado de la fibra.

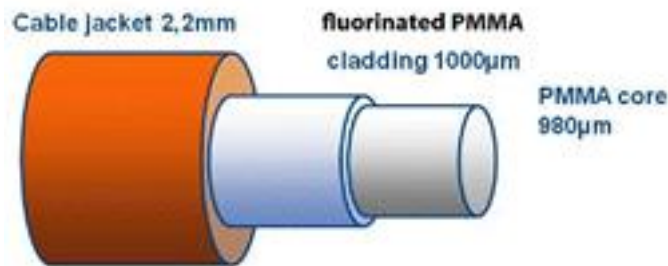
El uso de estas fibras en los sistemas de automoción es limitado dado elevado coste que suponen los sistemas PCS-VCSEL en el mercado actual, así como la dificultad en las instalaciones y reparaciones que supone la alta tolerancia mecánica producida por el bajo diámetro de núcleo de este tipo de fibras [1].



*Figura 2.4: Estructura de una fibra típica PCS*

### 2.2.2. Fibras PMMA

Para este trabajo, nos centraremos en las fibras ópticas de polímero PMMA, ya que como se ha comentado anteriormente, tiene unas propiedades más propicias a ser utilizadas en los sistemas vehiculares que las fibras PCS. Estas fibras constan de un núcleo de polímero y un revestimiento también de polímero cuyo índice de refracción es menor que el del núcleo, condición necesaria para formar una guía de luz.



*Figura 2.5: Fibra de PMMA*

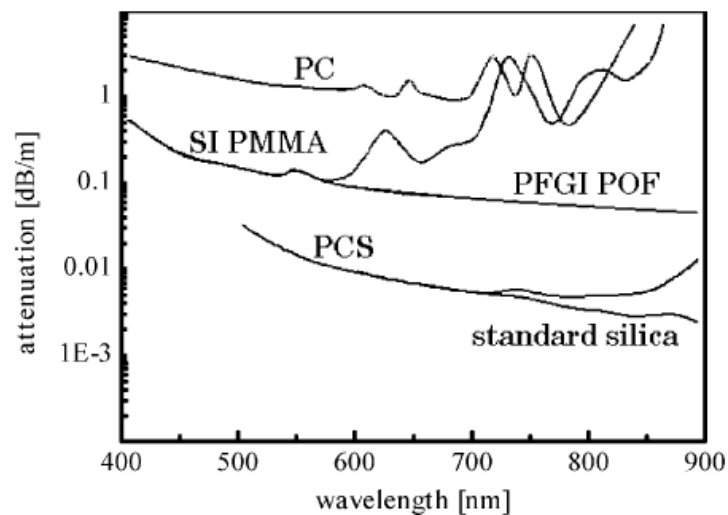
Las fibras con núcleo de polimetilmetacrilato (PMMA) y revestimiento de polímero acrílico se han usado tradicionalmente como guías para iluminación así como para transmitir señales ópticas a corta distancia (<100m), y es aquí donde es interesante este tipo de fibras para los sistemas automovilísticos. Estas fibras de polímero de 1 mm de diámetro, tienen algunas ventajas destacables con respecto a las fibras de vidrio para transmisiones de corta distancia [2]:

- **Flexibilidad:** Las fibras de plástico son mucho más flexibles que las fibras de vidrio. Además, al tener un diámetro de núcleo grande mantiene unas propiedades de flexión buenas.
- **Gran diámetro de la fibra:** Debido al gran diámetro de la fibra y la alta apertura numérica, de alrededor de 0.5, las tolerancias de ajuste para el transmisor y receptor son bastante holgadas. Los módulos del transceptor y conectores, por tanto, pueden ser fabricados de manera eficiente en lo que a coste se refiere usando moldeo por inyección, lo que tiene un interés elevado en el uso de estas fibras para los vehículos.
- **Fácil de procesar:** Las fibras son fáciles de tratar ya que el material es blando y no llevan mucho tiempo de proceso.

- **Resistente a la contaminación:** Como el diámetro de la fibra es grande, pequeñas partículas nocivas o la humedad sólo supondrá una pequeña atenuación despreciable. Por tanto se puede utilizar este tipo de fibras en condiciones irregulares del entorno.
- **Bajo coste:** En aplicaciones para vehículos (< 20m), las fibras de polímero resultan ser muy interesantes en función rendimiento/precio, ya que el coste total de la instalación viene dada principalmente por el precio de los conectores y los transceptores.

Uno de los factores determinantes en los sistemas de fibra óptica, y que se ha de tener en cuenta a la hora de diseñar sistemas ópticos, es la atenuación. Como se puede observar en la Figura 2.6, la atenuación de los diferentes tipos de fibra depende de la longitud de onda de trabajo.

En las fibras SI PMMA existen 3 mínimos de atenuación en 520 nm, 570 nm y 650 nm. Habitualmente, se utiliza la ventana de la longitud de onda visible roja de 650 nm (0.14 dB/m) ya que se dispone en el mercado de transmisores y receptores económicos en esta longitud de onda para sistemas monocanal.



*Figura 2.6: Atenuación típica de fibras de plástico y fibras de silicio*

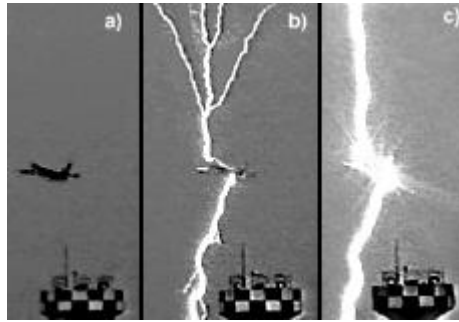
Otro parámetro importante a tener en cuenta es la limitación en temperatura de la fibra. Las fibras estándar PMMA están limitadas a 85°C y por esta razón su colocación está limitada al compartimento de los pasajeros y no se puede usar en el compartimento del motor o en el tejado, donde se puede dar temperaturas mayores que 85°C. Una alternativa a estas fibras que nos permite obtener una limitación en temperatura de 135°C son las PC POF (Polycarbonate POF) pero, en contrapartida, tienen una atenuación en el rango de longitud de onda visible de 1 dB/m y aún en su longitud de onda de mínima atenuación tienen 0.6 dB/m, un valor considerablemente elevado en comparación con la atenuación mínima de 0.14 dB de las fibras PMMA. Además, la disponibilidad de este tipo de fibras es limitada y su precio es mayor que las PMMA estándar.

En la Figura 2.6 podemos observar también picos de absorción y un incremento de atenuación alrededor de las longitudes de onda infrarroja, que es debida a los armónicos de las bandas de vibración del hidrógeno de carbono del polímero, en las fibras PMMA. Esto puede solucionarse sustituyendo el hidrógeno por deuterio o flúor, desplazando los armónicos a zonas más alejadas de los infrarrojos. Estas fibras (Perfluorinated graded-index POF) tienen una atenuación muy similar en 650 nm a las SI PMMA, pero se reduce considerablemente a medida que nos acercamos a 1µm. Además, cabe resaltar que han sido investigadas recientemente con resultados positivos, pero su elevado coste estimado y la limitación en temperatura a 70°C han hecho que no sea propicia para ser utilizada en sistemas de automoción [1].

### 2.3. Redes ópticas en aeronaves

Ya se ha comentado anteriormente que la proyección del uso de la tecnología óptica, y en concreto de los sistemas ópticos basados en fibras POF, es exponencial y así como se ha demostrado que constan de unas propiedades propicias para el uso de estas en coches, también se está traduciendo en la introducción de estos sistemas en el ámbito de la aeronáutica.

Con la finalidad de reducir el peso de las nuevas generaciones de aeronaves, cada vez más, se tiende a utilizar fuselaje de fibra de carbono, reduciendo bastante el peso de la aeronave y ahorrando mucho combustible. Pero este sistema tiene una contrapartida, y es que se pierden las ventajas en seguridad que tenía el fuselaje de metal, como el aislamiento de los rayos y de la radiación cósmica.



*Figura 2.7: Caída de un rayo en un avión*

En la Figura 2.7 se puede observar la propagación de un rayo golpeando un avión en vuelo. En la imagen b se puede observar como el rayo se propaga desde el morro del avión hasta la cola a través de la superficie del avión de metal sin afectar al interior del avión. Este fenómeno se conoce como jaula de Faraday y es el efecto por el cual un campo electromagnético en el interior de un conductor en equilibrio es nulo, anulando el efecto de los campos externos.

Sin embargo, en la imagen c se puede ver que el rayo no sigue la misma trayectoria que el anterior, introduciendo cargas en el avión, lo que puede producir daños en los equipos eléctricos y cables. Esto es debido a la fabricación de los aviones con fuselaje de carbono.

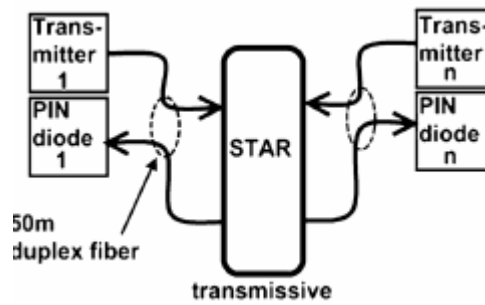
Este problema se podría solucionar con complejos sistemas de seguridad eléctricos que encarecerían los costes y el peso de los cables, sin embargo, mediante la aplicación del protocolo FlexRay como mecanismo de seguridad, utilizando cables ópticos, se podría conseguir un sistema de transmisión de datos seguro y barato [3].

El sistema propuesto se basa en la topología en estrella donde hasta 8 componentes se pueden interconectar entre ellos, donde cada nodo se compone de 2 puertos de entrada/salida o transmisor óptico/receptor óptico.

El protocolo FlexRay utiliza una tasa de transmisión de 10 Mbit/s para una distancia de hasta 100 m. Además el sistema tiene que ser estable a una temperatura desde  $-45^{\circ}\text{C}$  hasta  $85^{\circ}\text{C}$ . Para satisfacer estas especificaciones, se puede hacer uso de un LED rojo y una SI-POF como medio de transmisión, ya que se trata de un medio barato y robusto, que lo hace apto para aplicaciones en aeronaves.

La potencia óptica en el receptor es de unos  $-50\text{ dBm}$ , debido a las grandes pérdidas en la fibra para una distancia de 100 m, siendo el balance de potencia de la fibra de unos 19 dB y la atenuación en la estrella de 13 dB, lo que hace que en el receptor haya una potencia insuficiente para la sensibilidad de este. Por tanto el sistema LED/POF no sería conveniente para esta aplicación, sin embargo, sustituyendo el LED por un VCSEL y la SI-POF por una PCS conseguimos una atenuación menor y unas prestaciones mejores.

Además de la baja atenuación a 850 nm, que es donde se trabaja en estos sistemas, los VCSEL ofrecen un menor consumo de corriente y una eficiencia de acoplo mayor que los LED. También cabe destacar que la sensibilidad del receptor es mayor en 850nm (0.63 A/W) que en 650nm (0.47 A/W), por tanto conseguimos un balance de 30 dB y por tanto se puede usar componentes con una atenuación de hasta 27 dB (3 dB de margen).



*Figura 2.8: Sistema de 2 fibras con estrella en transmisión*

Por tanto, mediante este sistema de comunicación de datos para los sistemas de seguridad de los aviones, se consigue tener una instalación prácticamente en su totalidad óptica, y por tanto, cabe la posibilidad de realizar la estructura de fuselaje del avión de fibra de carbono, reduciendo sustancialmente el peso de las aeronaves y reduciendo el elevado coste de los sistemas eléctricos [3].

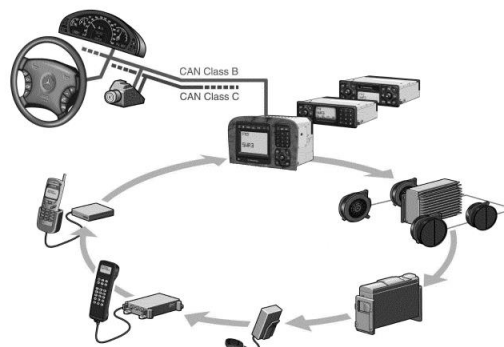
## 2.4. Sistema MOST

### 2.4.1. Introducción

Hacia 1996, se comenzó a plantear los inicios del sistema MOST, el cual fue introducido por BMW en colaboración con Becker y OASIS Silicon Systems basándose en el sistema ya desarrollado D2B y que fue puesto en marcha por Mercedes. Después de unos años de investigaciones en lo que respecta a la capa física, dirección de la red y la capa de aplicación del sistema, en 1998 se fundó la organización MOST Cooperation por BMW, Daimler Benz y OASIS Silicon System, ampliándose en poco tiempo a casi 80 colaboradores en los que se incluían fabricantes de coches, fabricantes de equipos de entretenimiento y fabricantes de componentes electrónicos.

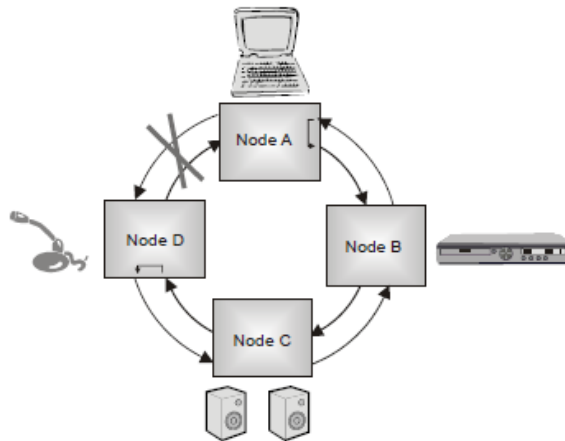
El sistema MOST poco a poco ha ido evolucionando hasta ser el principal sistema de fibra óptica de plástico para utilidades de entretenimiento y ayuda a la conducción en los automóviles, utilizando una topología en anillo o doble anillo fácil de implementar y con un rendimiento excelente. Actualmente, son multitud las marcas en el mercado que utilizan este tipo de sistemas como Mercedes, BMW, Porsche...etc.

MOST usa fibra óptica de plástico (POF) como medio de transmisión debido a las numerosas ventajas que presenta su uso entre las que se encuentran las citadas en el punto 2.2.2 y además se basa en los sistemas LED-POF, los cuales utilizan LEDs a 650nm y fotodiodos pin de silicio para las transmisiones punto a punto. La estructura básica se trata de un anillo que transmite información de un dispositivo a otro de manera física. Esta topología facilita que cualquier nodo del anillo (dispositivo) puede ser quitado o añadido sin que el resto de la red se vea influenciada lo que mejora la fiabilidad del sistema [2].



*Figura 2.9: Ejemplo de anillo MOST*

Además MOST contempla la posibilidad de utilizar una topología de doble anillo para mejorar aún más la fiabilidad del sistema, a costa de incrementar el número de transceptores en cada nodo y por tanto, incrementando el precio de la red. En esta topología se utiliza 2 transceptores en cada nodo y se envía la información en ambos sentidos del anillo con la finalidad de que si se produce algún fallo en la comunicación de alguno de los nodos, se subsane mediante la comunicación redundante del anillo.



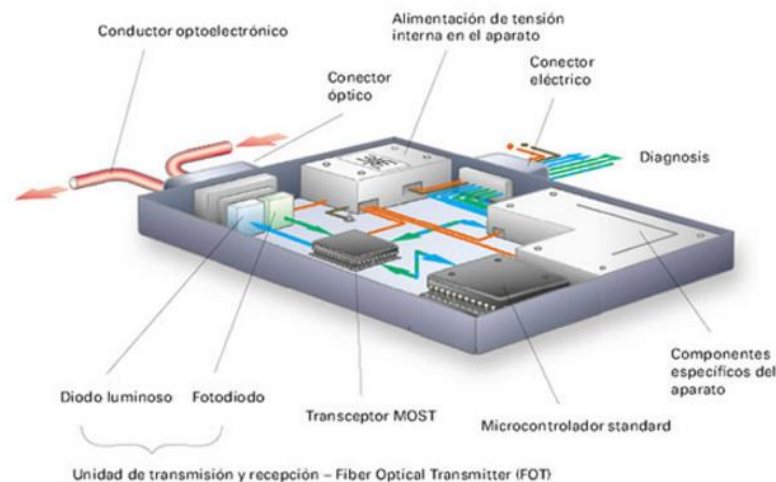
*Figura 2.10: Ejemplo de doble anillo MOST*

Después de diferentes versiones del sistema en las cuales se mejoraba la tasa de transmisión y se permitía nuevas funcionalidades, en 2013 salió a la luz la última versión del sistema, MOST150, una versión LED-POF que permite dar servicio de audio, vídeo y Ethernet en el automóvil con una tasa de datos de hasta 150 Mbps, permitiendo la transmisión de formatos de vídeo como DVD o Bluray y añadiendo el canal Ethernet inexistente en las versiones anteriores.

#### 2.4.2. Unidades de control/Nodos

En los sistemas ópticos en automóviles, una pieza fundamental del sistema son las unidades de control, donde se encuentran el transmisor y receptor ópticos, pero donde además existen otros componentes importantes para el funcionamiento del sistema.

Para entender el funcionamiento de una unidad de control, se puede tomar como ejemplo una unidad de control de un sistema que utilice el estándar MOST.



*Figura 2.11: Unidad de control MOST*

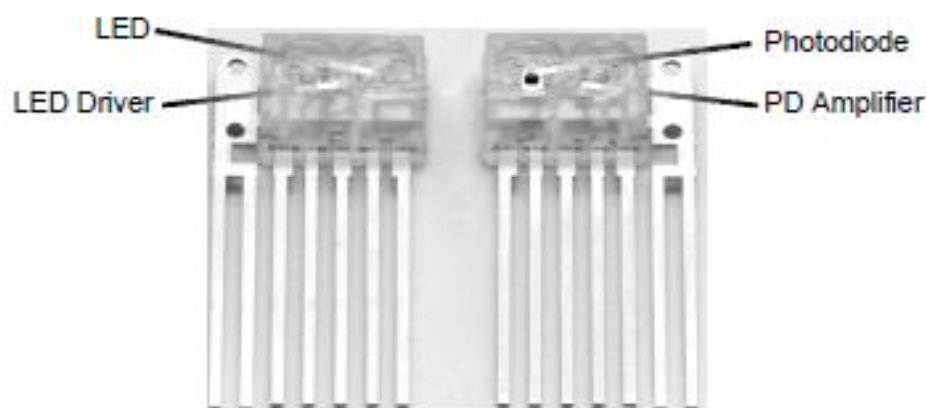


Algunos componentes de las unidades de control en los buses MOST son los siguientes [2]:

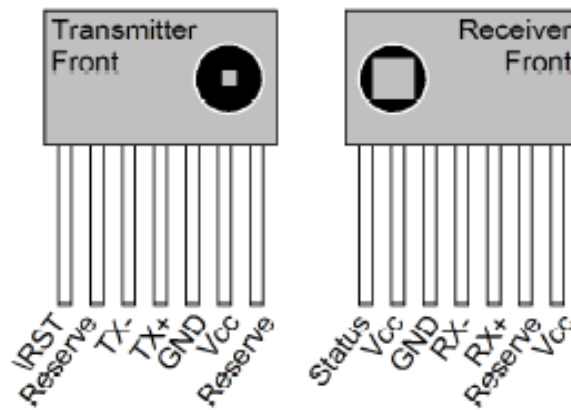
- Conector óptico para conductor optoelectrónico (LWL): A través de este conector pasan las señales de luz hacia la unidad de control o bien las señales luminosas generadas pasan hacia el siguiente abonado del bus.
- Conector eléctrico: Mediante este conector se realiza la alimentación de tensión, así como la diagnosis de fractura del anillo y las señales de entrada y salida.
- Alimentación de tensión interna en el aparato: La tensión que se introduce mediante el conector eléctrico se reparte por está alimentación hacia los componentes.
- Unidad de transmisión y recepción (Fiber Optical Transmitter, FOT): Está compuesta por un fotodiodo y un diodo luminoso (LED). Las señales ópticas recibidas se transforman por el fotodiodo en señales de tensión, que se retransmiten hacia el transceptor MOST. El diodo luminoso transforma las señales de tensión del transceptor MOST en señales luminosas. Las señales ópticas generadas tienen una longitud de 650 nm y son visibles en forma de luz roja. Una vez modulada la señal óptica, se conduce por el conductor optoelectrónico hasta otra unidad de control.
- Transceptor MOST: El transceptor MOST consta del transmisor y del receptor. El transmisor envía los mensajes en forma de señales de tensión hacia la FOT. El receptor capta las señales de tensión de la FOT y retransmite los datos requeridos hacia el microcontrolador standard o unidad central de procesos (CPU) de las unidades de control. Los mensajes de otras unidades de control que no se necesitan pasan a través del transceptor sin transmitir datos a la CPU.
- Microcontrolador standard (CPU): El microcontrolador standard es la unidad central de procesos (CPU) en la unidad de control. Consta de un microprocesador que gestiona todas las funciones esenciales de la unidad de control.
- Componentes específicos de aparatos: Estos componentes se encargan de ejecutar funciones específicas de unidades de control, p. ej. unidad DVD, receptor de radio.

### 2.4.3. Unidad de transmisión y recepción

Por lo que respecta a la unidad de transmisión y recepción, FOT, podemos comentar que se utilizan LEDs y sus respectivos drivers, y fotodiodos con sus amplificadores y, que además, se suelen encontrar encapsulados habitualmente en un material plástico transparente, por separado, del cual salen 7 patillas que sirven de contacto para diferentes funciones como la alimentación, señales de datos diferenciales o líneas de control, entre otras.



*Figura 2.12: FOT en THM*



*Figura 2.13: Asignación de pines en los módulos de transmisión y recepción*

Ambos módulos contienen una conexión de alimentación Vcc de 3.3V y una conexión a tierra. Además tienen dos entradas de datos diferencial, TX+ y TX-, así como dos salidas diferenciales, RX+ y RX-. Se puede apreciar una patilla de RESET en el transmisor, /RST, que permitirá encender o apagar la salida óptica durante un tiempo definido durante la puesta en marcha o durante el apagado que permitirá evitar errores ópticos en el transceptor. El pin Status en el receptor permitirá poner el modo “listo para recibir” en el momento en el que el receptor reciba señal de datos [2].

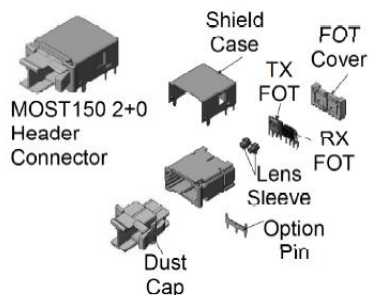
Desde que se puso en marcha la tecnología MOST150, también salió a la luz un encapsulado SMD para la unidad de transmisión y recepción. La tecnología de montaje superficial se basa en el montaje de los componentes sobre la superficie de un circuito impreso lo que mejora en muchos aspectos a la tecnología THT. A parte de reducir el peso y las dimensiones de los circuitos, lo que conlleva una reducción también en los costes de fabricación, estos elementos reducen las interferencias electromagnéticas y permiten, además, tasas de transmisión más altas, del orden de los gigabit. Se puede observar un módulo FOT SMD con pines de conexión en la Figura 2.14.



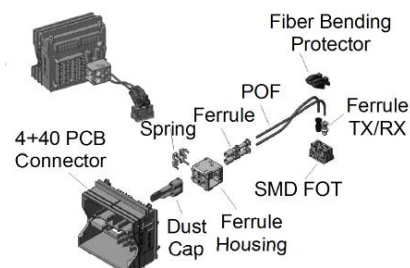
*Figura 2.14: FOT en SMD*

#### **2.4.4. Conectores**

Para conectar las fibras ópticas a las unidades de control es necesario añadir conectores que aporten una conexión estandarizada, estos conectores son por ejemplo, en el caso del estándar MOST el MOST150 2+0 o el MOST150 4+40, donde el primer dígito indica los contactos ópticos y el segundo dígito los contactos eléctricos. Aunque en ocasiones los transmisores y receptores son más avanzados y el sistema de conexión a la fibra no necesita de conectores.

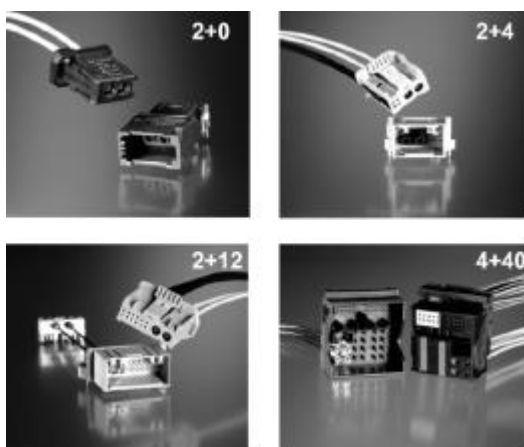


**Figura 2.15: Conector MOST150 2+0**



**Figura 2.16: Conector MOST150 4+40**

Algunos conectores utilizados en las diferentes variantes del sistema MOST pueden ser observados en la Figura 2.17, así como en las figuras 2.15 y 2.16, para diferente número de contactos ópticos y eléctricos [2].



**Figura 2.17: Conectores para los transceptores en sistemas MOST**

#### 2.4.5. Formatos de modulación

Ya se ha comentado que los sistemas LED-PMMA se tratan de sistemas robustos, eficientes en coste y fáciles de instalar, por lo que son sistemas muy atractivos para soluciones automovilísticas en transmisión de datos. El problema es que debido al gran diámetro de estas fibras, la dispersión modal limita su ancho de banda a unos 100 MHz por 100m, lo que es un valor muy pequeño en comparación con los cables de cobre o las fibras de vidrio. Por tanto es importante encontrar un sistema de modulación que permita tener una tasa de transmisión admisible para los propósitos que se buscan en los automóviles (vídeo, audio...).

Por lo general, para los sistemas POF se ha estado utilizando una modulación NRZ para las comunicaciones tanto en redes domésticas, industriales o aplicaciones de entretenimiento y comunicación en automóviles. Esta modulación ha sido ampliamente extendida en fibras GOF con excelentes resultados y se ha demostrado que también se ha podido utilizar en POF obteniendo 150 Mbps con un balance de potencias adecuado y detección directa, usando un amplificador limitador, pero si se quiere obtener tasas de datos del orden del gigabit se necesitarían modulaciones más avanzadas.

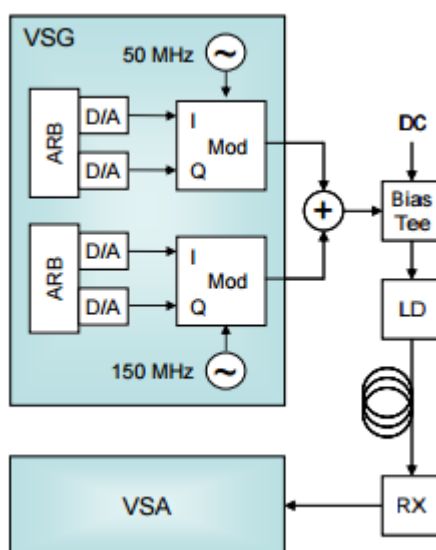
Una de las técnicas más eficientes y utilizada en MOST es la modulación multinivel PAM (Pulse Amplitude Modulation), donde el número de niveles se define según el ancho de banda, el bit rate necesario y el código. Esta modulación es una técnica de modulación de señales analógicas donde el parámetro que varía en la señal es la amplitud, manteniendo el desfase y la frecuencia fijas. Se ha demostrado que mediante una 16-PAM y un ancho de banda de 150 MHz, se puede conseguir una solución a 1 Gbps, con una ecualización y una codificación de canal adecuadas, aunque mediante

modulaciones 3-PAM y 5-PAM también se obtienen soluciones interesantes pero a menor tasa de datos [5].

Otra solución prometedora es el uso de una modulación adaptativa de múltiples subportadoras de alta eficiencia espectral, que puede alcanzar los 1 Gbit/s de tasa de transmisión de datos en un rango de 100m con una fibra SI-POF, pero pensada en principio para aplicaciones de internet en el hogar.

En la Figura 2.18 se puede ver el sistema completo de modulación adaptativa por subportadoras. Se definen 2 bandas de transmisión, cada una dividida en 40 subcanales en una cuadrícula de 2 MHz. Estas 2 bandas se generan con el generador del vector señal (VSG), el cual incluye un generador de ondas arbitrario (ARB) el cual se encarga de realizar las formas de onda. Una vez se pasa por el conversor A/D, las componentes en fase y cuadratura son moduladas a señales RF con un oscilador de 50 MHz primero y luego de 150 MHz. A continuación, estas dos señales son combinadas y moduladas en un láser diodo a 650 nm (LD), introduciendo una señal de alimentación DC que permite la transmisión lineal. La luz emitida por el LED es acoplada a la fibra SI-POF de 1 mm de diámetro y llega al fotodiodo p-i-n y su amplificador de transimpedancia, para demodular la señal, finalmente, en un analizador de vectores (VSA) [6].

Asumiendo una modulación 256-QAM para la banda baja y una modulación 64-QAM para la banda alta, podemos conseguir 1 Gbit/s de tasa de transmisión ( $40 \text{ Canales} \times 1.8 \text{ MBd/Canal} \times (8 \text{ bit/símbolo} + 6 \text{ bit/símbolo}) = 1.008 \text{ Gbit/s}$ ).



*Figura 2.18: Sistema de modulación por múltiples portadoras*

#### 2.4.6. Requisitos ópticos del sistema MOST

Dado el elevado grado de implementación del sistema MOST en la actualidad para los sistemas de fibra óptica de plástico en soluciones vehiculares, es interesante tomar como modelo a tener en cuenta los parámetros con los que trabaja este tipo de sistemas y plasmarlos realizando nuestras propias modificaciones en el sistema, con el fin de obtener un sistema robusto y que sea capaz de soportar las funcionalidades propias del vehículo.

Por lo que respecta a los requisitos ópticos y eléctricos del sistema, la especificación MOST Phy150 define todas las especificaciones mínimas de los diferentes parámetros para las condiciones más desfavorables del sistema y obteniendo una tasa de 150 Mbps para una longitud máxima de 15m.

En primer lugar la limitación en temperatura, como ya se ha comentado antes, va desde los -40°C a los 95°C, con una resistencia a la humedad de hasta el 85% para una temperatura de 95°C y un tiempo de

vida de unos 15 años. Además la longitud de onda de 650 nm corresponde con un mínimo de atenuación de las fibras PMMA en el rango de la longitud de onda visible, y por tanto, el rango admisible de longitudes de onda de trabajo va desde los 630 nm a los 685 nm con un ancho espectral restringido a los 30 nm (FWHM).

En lo referente a la potencia óptica en el SP2 (interfaz óptica de salida de transmisor), que se puede observar en la Figura 2.19 y definido por el estándar MOST150, se especifica una potencia de entre -8.5 dBm y -1.5 dBm, manteniendo el mínimo de potencia en ese valor para asegurar la recuperación de los datos en el receptor e intentando no superar el límite superior con el fin de no sobrecargar el receptor. La potencia definida para el SP3 (entrada óptica en el receptor), está definida entre -22 dBm y -2dBm.

La máxima frecuencia de trabajo del sistema debe ser de unos 75 MHz, lo que limita el ancho de banda y permite garantizar la integridad de la señal para un enlace que no supere los 15-20m.

Por lo que respecta a los niveles de señal en SP1 y SP4, están definidos en el estándar LVDS (Low Voltage Differential Signaling), y se basa en la señalización diferencial para evitar las interferencias electromagnéticas.

La mínima potencia óptica transmitida y la responsividad del receptor determinan el margen de potencia disponible, que es de unos 13.5 dB, aunque las pérdidas introducidas por los conectores en las interfaces SP2 y SP3, que suelen ser de 2.5 dB cada uno en el caso de que se necesiten conectores, hacen que se reduzca el margen hasta los 8.5 dB. Por tanto las pérdidas totales de la conexión óptica entre dos dispositivos no puede exceder estos 8.5 dB, así se tendrá que tener en cuenta la atenuación de la fibra, los conectores y las posibles pérdidas por torsión o deterioro de la fibra. Además se tendrá que tener en cuenta la atenuación efectiva de la fibra, dando importancia a las variaciones por temperatura, por ejemplo, y que podría incrementar la atenuación estándar de la fibra PMMA a 650nm de 0.14 dB a 0.4 dB [2].

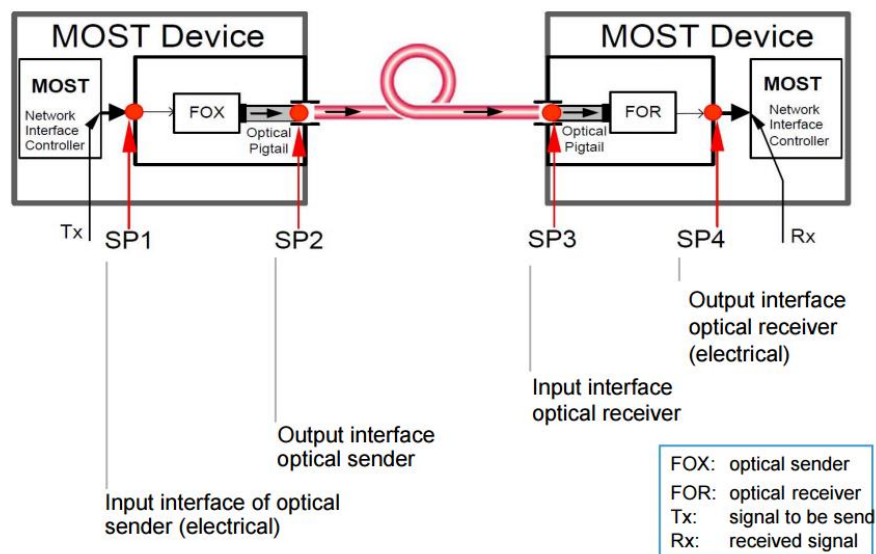


Figura 2.19: Estructura de un sistema MOST típico

## 2.5. Fuentes ópticas

Para que un dispositivo emisor de luz se pueda emplear para transmitir información se necesita que cumpla algunas condiciones: que la radiación se acople fácilmente a la fibra, que se pueda modular mediante tecnología electrónica y que la respuesta sea alta. Los dispositivos que cumplen todas estas condiciones se tratan de dispositivos optoelectrónicos semiconductores como son los LED y los diodos láser.

### 2.5.1. LED

En el caso de las fibras de PMMA, la fuente óptica utilizada son los LEDs, que son comercializados en grandes cantidades para los consumidores haciéndolos muy baratos, fáciles de utilizar y fiables para longitudes de onda cerca de 520nm, 570nm y 650nm, para enlaces con poco ancho de banda. Estas características hacen que sea habitual su utilización para enlaces de comunicaciones ópticas de poco alcance. Los diodos LED tienen un diagrama de radiación muy abierto (lambertiano), por lo que se adapta mejor a fibras ópticas con apertura numérica alta como podría ser las fibras multimodo. Además, en comparación con los diodos láser, la dependencia con la temperatura de su potencia óptica de salida no es muy elevada, aunque su ancho de banda es reducido (200 MHz aproximadamente).

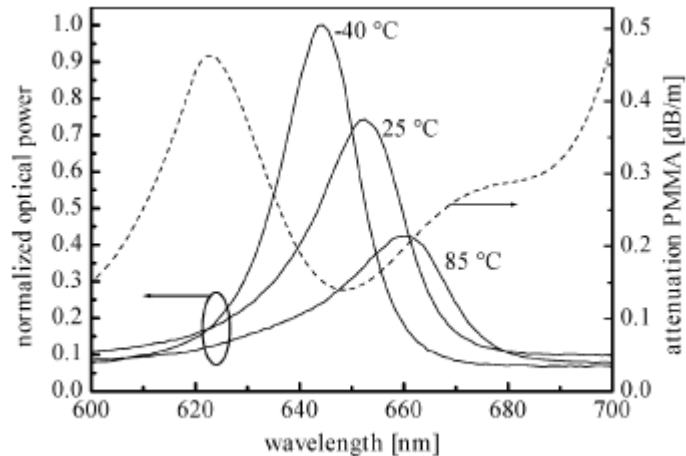
Existen diferentes materiales a la hora de fabricar LEDs según sean con gap de banda directa o banda indirecta. Los semiconductores de banda directa pueden ser GaAs, GaSb o InAs, y funcionan mediante la recombinación directa de electrones que da lugar a un fotón. Por otro lado, los semiconductores de banda indirecta como los Si, Ge o GaP, en la recombinación de electrones generan simultáneamente un fotón y un fonón (vibración). La probabilidad de transición es mucho mayor en banda directa que en indirecta, por lo que los semiconductores de banda directa son los preferidos para fabricar LEDs.

En la tabla 2.1 se pueden extraer algunos datos acerca de las características de un LED GaAs típico trabajando a 650nm. Se puede observar que el ancho espectral suele ser menor de 30nm, con un valor típico de 20 nm. Además la potencia emitida suele ir desde los -10 dBm a los -1.5 dBm con unos tiempos de subida y bajada menores de 6 ns, lo que permite transmisiones con un bitrate de hasta 150 Mbps. Estos tiempos de respuesta se definen como la rapidez con la que se lleva al LED de encendido a apagado y viceversa, o el tiempo en llegar desde el 10% al 90% y del 90% al 10% de la potencia máxima radiada, una vez que se hace fluir la corriente a través de sus terminales y que están directamente relacionados con el ancho de banda óptico.

<b>LED 650nm</b>	
Ancho espectral (nm)	< 30
Potencia emitida (dBm)	-10...-1.5
Tiempo de subida (ns)	< 6
Tiempo de bajada (ns)	< 6
Bit rate (Mbps)	4...25...50...150

*Tabla 2.1: Tabla de características LED rojo típico [1]*

Un caso especial de LED son los RCLEDs (resonant-cavity light-emitting diodes) en los cuales se modifica la emisión espontánea del LED incrustando la capa activa en una cavidad resonante. Los RCLEDs mejoran el ancho de banda hasta los 500 MHz, así como la eficiencia hasta el 10% en comparación con los LEDs tradicionales. Además la eficiencia de acoplo a las fibras POF de 1mm de diámetro de núcleo se eleva hasta el 25%. Un aspecto a tener en cuenta en los RCLEDs es la diferencia de potencia óptica según la temperatura, ya que esta diferencia puede elevarse hasta los 10 dB (1-2 dB en LEDs rojos y verdes) en el rango desde los -40°C hasta los +85°C, aunque si la luminiscencia y la longitud de onda se ajustan correctamente, esta variación de potencia se puede reducir prácticamente hasta los 3 dB [1].



*Figura 2.20: Espectro en potencia de un LED para diferentes T°C. La línea discontinua muestra la atenuación de una fibra estándar PMMA POF*

### 2.5.2. Diodo láser

Otra fuente óptica interesante son los diodos láser que se utilizan de una manera similar a los diodos LED, es decir, como un diodo p-n polarizado directamente, sin embargo, no lo es en lo referente a los fotones ya que en los diodos láser se produce una emisión estimulada mientras que en los LEDs esta emisión era espontánea.

Mediante el láser se puede subsanar alguna de las desventajas de los LEDs como era su amplio espectro de emisión y la imposibilidad de utilizarlo en sistemas para modular con frecuencias muy elevadas. Aprovechando las características especiales de las cavidades ópticas y de la emisión estimulada, los diodos láser son capaces de emitir señales con un espectro menor que el LED y es capaz de ser modulado con señales de hasta decenas de GHz, además el haz luminoso de los láseres no se abre tanto como el LED, pudiendo generar rayos de luz de alta intensidad y con una gran focalización.

Otra característica de los láseres es que emiten una potencia bastante elevada que permite introducir elementos en el sistema que tengan pérdidas considerables. Por el contrario, sus características ópticas dependen de una manera importante de la temperatura ambiente y están limitados a unos 70°C (láser de luz roja) y 50°C (láser de cavidad vertical), por lo que su uso en los automóviles, en la mayoría de los casos, requiere de un refrigerador. Por lo que respecta a los materiales, dependerá de la zona del espectro donde se trabaje, siendo habituales para el rango visible materiales como el GAs, HeNe o Ar.

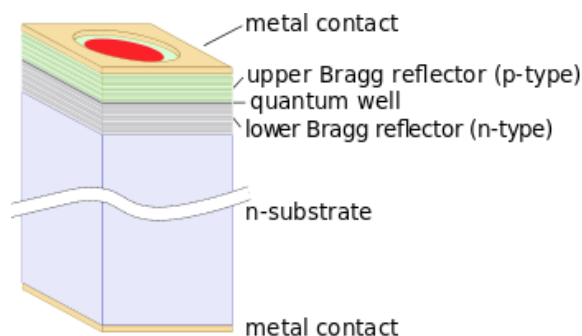
<b>Láser Fabry Perot</b>	
Ancho espectral (nm)	< 5
Potencia emitida (dBm)	<20
Tiempo de subida (ns)	< 3
Tiempo de bajada (ns)	< 3
Bit rate	>1Gbps

*Tabla 2.2: Tabla de características típicas de un láser Fabry-Perot*

De igual manera que en los LED, en los láseres se generan fotones a partir de la recombinación de pares electrón-hueco, pero en los láseres tendremos una cavidad óptica que guíe los fotones generados. Existen muchas cavidades para diodos láser, siendo las más importantes la cavidad Fabry-Perot, cavidades con realimentación distribuida con redes de difracción y cavidades de láseres de emisión superficial.

Un tipo de tecnología que se está extendiendo mucho en el contexto de los sistemas de comunicaciones de datos mediante láseres es la tecnología VCSEL, mediante la cual se consiguen láseres de una

eficiencia elevada y una capacidad de modulación alta. Los láseres VCSEL, Vertical-Cavity-Surface-Emitting Laser, se tratan de láseres basados en la recirculación de luz en una cavidad óptica girada 90 grados (vertical), con lo que la luz emitida es perpendicular a la superficie del láser. La zona activa es de unas centésimas de micra y se sitúa entre dos espejos, por lo que requiere la utilización de muchos más espejos reflectores que se comportan como reflectores distribuidos de Bragg.



*Figura 2.21: Diagrama de una estructura VCSEL simple*

Son varias las diferencias entre cada uno de los elementos de radiación óptica expuestos y que hacen que, dependiendo de las aplicaciones, se utilice uno u otro.

	<b>Láser</b>	<b>LED</b>
Tiempo de respuesta	✓	
Tiempo de vida		✓
Potencia óptica	✓	
Complejidad		✓
Coste		✓
Ancho de banda de modulación	✓	
Anchura espectral	✓	
Estabilidad térmica		✓

*Tabla 2.3: Tabla comparativa de láser y LED*

En la tabla 2.3 se puede observar una comparativa entre las características de los diodos láser y los diodos LED. En primer lugar, destacar que el tiempo de respuesta desde que llega la corriente hasta que se emite el haz de luz es menor en los láser que en los LED, lo que permite enlaces con mayores tasas de datos. Por otro lado, los LED son diodos semiconductores muy simples y cuya fabricación no es compleja y de coste no muy elevado. Además, los LED tienen una estabilidad térmica muy buena y la potencia no sufre grandes variaciones ante cambios de temperatura, teniendo además un tiempo de vida aproximado mayor que en el caso de los láseres. Por el contrario, la potencia que suministran los láseres es mayor en general que en los LEDs, con un haz, además, más cerrado que en los LEDs que permite haces más confinados en potencia. Por último, destacar que los láseres se pueden modular a altas velocidades, de hasta GHz, mientras que los LEDs suelen llegar hasta los 200 MHz como máximo.

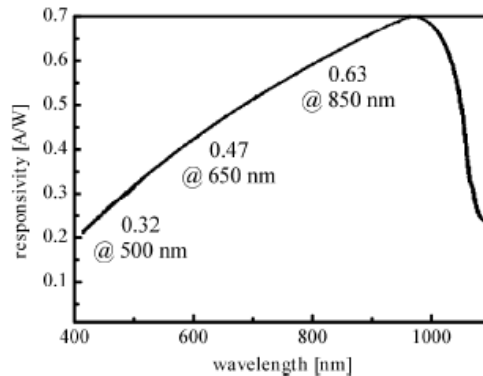
## 2.6. Receptores

Por lo que respecta a los receptores usados en los sistemas ópticos para comunicaciones de datos en sistemas POF, los más utilizados son los fotodiodos p-i-n de silicio, que son receptores eficientes en lo que a precio se refiere y que permiten transformar señales ópticas en señales eléctricas.

Dependiendo del material empleado en la composición del fotodiodo, trabajará en un rango de longitud de onda, en este caso, el silicio es sensible a la luz visible. Estos fotodiodos son usados en el rango de



longitudes de onda desde los 400 a los 1100 nm, presentando una responsividad, para un fotodiodo p-i-n de silicio típico, como la mostrada en la Figura 2.22, donde se puede apreciar que para la longitud de onda de 650 nm, el fotodiodo presenta una responsividad de 0.47 A/W.



*Figura 2.22: Responsividad de un fotodiodo p-i-n de silicio*

En lo referente a la utilización en sistemas LED-PMMA, son necesarios fotodiodos con una gran zona activa para poder convertir eficientemente la luz suministrada por las fibras PMMA, las cuales tienen un diámetro grande (1mm). Esto se traduce en la necesidad de una gran capacidad y por tanto se ve reducido el ancho de banda. Con una zona activa de unos 0.4 mm<sup>2</sup> en el fotodiodo pin de silicio, se pueden alcanzar los 1.5 GHz de ancho de banda pero dado que esta zona activa es menor que el diámetro de la fibra, el haz de luz excede la zona activa y se pierde eficiencia. Una manera de solucionar esto es utilizar lentes para concentrar el haz de luz en la zona activa, aunque se siguen dando pérdidas en la interfaz entre la fibra y el receptor, y menos de -30 dBm de sensibilidad para una BER de alrededor de 2.5e-10 [1].

Cabe destacar también que, en lo que respecta a los sistemas PCS-850-nm VCSEL, la responsividad de los fotodiodos p-i-n de silicio en la longitud de onda de 850 nm es de 0.63, mayor que la de 650 nm, como se puede ver en la Figura 2.22. Además, dado las características de los VCSEL, se necesita receptores con zonas activas menores y por tanto la capacidad necesaria es menor y el ancho de banda aumenta.

Parámetro	Sistema POF/LED	Sistema PCS/VCSEL
Máx. potencia óptica de salida	-1.5 dBm	> -1.5 dBm
Mín. potencia óptica de salida	-10 dBm	-5 dBm
Mín. potencia óptica recibida	-23 dBm	-30 dBm
Rango dinámico	13 dBm	25 dBm
Atenuación de la fibra	0.14 dBm	< 0.01 dBm

*Tabla 2.4: Ejemplo de balance de potencias entre sistemas para valores típicos y BER=2.5e-10.*

## 2.7. Aplicaciones y requisitos

Con la última generación de sistemas de información y entretenimiento en vehículos por 2013, por fin fue posible transportar contenido de vídeo comprimido, como pueden ser los formatos de DVD, Blu-ray o contenido en una memoria portable. Estos contenidos se unen a las demás funcionalidades que ya existían en los sistemas MOST, como eran los sistemas de sonido. Para estas transmisiones de contenido multimedia, se utilizan procedimientos de codificación actuales como son PCM y MPEG, aplicando el protocolo DTCP (Digital Transmission Content Protection) para transmitir contenido protegido por copyright. Las principales funciones de los sistemas POF en los automóviles son las de audio, vídeo y

Ethernet, existiendo también la posibilidad de introducir también algunos sistemas de seguridad como airbags o ABS pero cuya implementación está más extendida en la modalidad de cable coaxial, por tanto nos centraremos en los anteriormente nombrados.



*Figura 2.23: Conectividad en automóvil*

### 2.7.1. Vídeo

La fuente de vídeo de la unidad central transmitirá la señal de vídeo vía streaming, usando los canales estipulados para transmitir datos en streaming sin una tasa de datos fija, por lo que el ancho de banda se asigna para los canales streaming o para los paquetes de datos. La tasa de datos por stream será de unos 15 Mbps, teniendo en cuenta deberá existir un stream de señalización y que la señal de vídeo será comprimida en el origen con el fin de reducir la tasa de datos en el enlace, sistema que se utiliza en el Mercedes Clase S. Con las últimas tecnologías vigentes, el sistema de audio será capaz de transmitir vídeos en HD así como Blu-Ray [2].

### 2.7.2. Audio

En lo referente al audio en el automóvil, al igual que en el vídeo, el sistema debe ser capaz de leer los diferentes sistemas y codificaciones que se pueden dar y debe ser capaz de identificarlos. Se suele utilizar una frecuencia de muestreo de 44.1 o 48 kHz para transmitir audio en Hi-Fi, por lo que los aparatos que no utilicen esta frecuencia de muestreo deberán usarse mediante una conversión del muestreo. Alguno de los formatos de audio utilizados son los siguientes [2]:

**Stereo:** La señal sin comprimir tiene una tasa de 1.4 Mbit/s con un muestreo de 44.1 kHz y una resolución de 16 bits. La señal comprimida más usada tiene una tasa de 128 kbit/s para MP3.

**Dolby Digital, AC3:** AC3 consiste en 5 canales separados sin limitación en frecuencia y un subwoofer limitado a 120 Hz. Con un muestreo de 48 kHz y una resolución de 16 bits se consiguen tasas desde 383 a 448 kbit/s con una relación de compresión 1:10. Para dos canales sólo, estéreo, la tasa de transmisión se reduce a 192 kbit/s.

**MPEG-2:** Se trata de un formato de codificación que se puede encontrar también en un DVD para señales de audio además de AC3. La tasa para 6 canales es de alrededor de 400 kbit/s.

**Digital Theatre System (DTS):** Se trata de un sistema 4.1 que se caracteriza por tener una mejor calidad de sonido y unas dinámicas más intensas. Tiene menos compresión que otros formatos y su tasa de transmisión es de 1.536 Mbit/s.

### 2.7.3. Ethernet

Con las últimas tecnologías en lo que a estándares de transmisión de datos se refiere, el sistema será capaz de transmitir tráfico IP desde las unidades centrales del automóvil para proveer de acceso a internet y sus servicios. En el caso del estándar MOST150, como ejemplo más significativo, debido a que MEP (canal Ethernet) puede transportar frames siguiendo el estándar IEEE 802.3, los aparatos utilizados por los usuarios que utilicen protocolos basados en TCP/IP se pueden comunicar sin ningún problema [2].

El canal MEP es utilizado para varias funciones en el automóvil:

- Transmisión de datos IP: compartición de acceso a internet mediante Wi-Fi tethering o mediante la captación de señal LTE a través de una tarjeta móvil o un router.
- Comunicación en la capa de aplicación MOST: intercambio de datos entre la unidad central y la parte trasera del coche o transmisión de datos de gran tamaño como una guía de direcciones.

Todo esto se puede conseguir con una tasa de datos menor a 10 Mbit/s en el canal de datos, aunque si se pretende incluir sistemas de aparcamiento asistido, por ejemplo, añadiendo una cámara trasera, se debería alcanzar una tasa de datos más alta.

## Capítulo 3. Diseño de la red óptica monocanal en vehículos

### 3.1. Especificaciones de servicios y vehículo

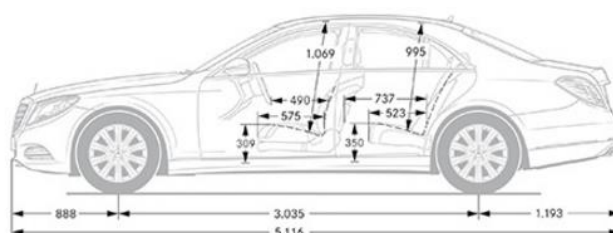
A continuación, vamos a proceder al diseño de una red óptica monocanal para su uso en vehículos con una topología en anillo, teniendo en cuenta las especificaciones de los servicios que se ha explicado en los requisitos de las aplicaciones y eligiendo el vehículo a implementar.

En lo que respecta al sistema de audio en el vehículo se va a optar por el sistema DTS 4.1 en el cual se utiliza 2 altavoces laterales delanteros, 2 altavoces laterales traseros y 1 subwoofer en la parte trasera del coche. En el diseño del sistema de audio vamos a suponer las siguientes fuentes de audio: Unidad central delantera (USB, DVD, cable Jack móvil, CD, Bluray, Ipod, Minidisk, tarjeta SD y Bluetooth). Teniendo en cuenta que este sistema utiliza 1.536 Mbps por stream (entrada de audio), la tasa de transmisión total para audio será de 13.82 Mbps, pero se realizará un sobredimensionamiento para poder realizar posibles adiciones en el número de fuentes de audio, lo que llevará a utilizar una tasa de transmisión de 20 Mbps.

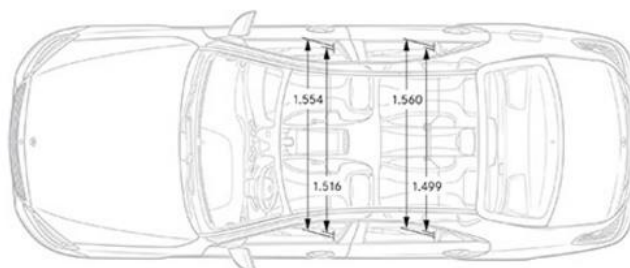
Para el sistema de video en el coche vamos a suponer 3 pantallas en el automóvil, 2 detrás de los asientos delanteros y 1 en la parte delantera del copiloto, donde se podrá reproducir 3 vídeos en HD, uno para cada asiento. Para cada stream es necesario 15 Mbps y será necesario también un stream de señalización. También se podrá reproducir un único vídeo Blu-ray, reservando un ancho de 50 Mbps. Por tanto, la tasa de transmisión necesaria para el correcto funcionamiento del sistema será 65 Mbps [7].

Al canal Ethernet se le asignará el resto de ancho de banda con la finalidad de que se pueda tener en el automóvil servicio sms, e-mail, navegación en páginas web para todos los ocupantes y Wi-Fi hotspot.

Para el diseño del sistema se necesita saber las medidas aproximadas del automóvil con el fin de saber los metros de fibra que habrá que desplegar y dónde se colocarán los elementos que lo forman. En este caso, se ha optado por tomar como modelo de automóvil el Mercedes Clase S y cuyas medidas se pueden observar en los siguientes bocetos:



*Figura 3.1: Perfil del Mercedes Clase S (mm)*



*Figura 3.2: Planta del Mercedes Clase S (mm)*

A continuación se mostrará un esquema con la topología de la red completa con las distancias entre los diferentes dispositivos:

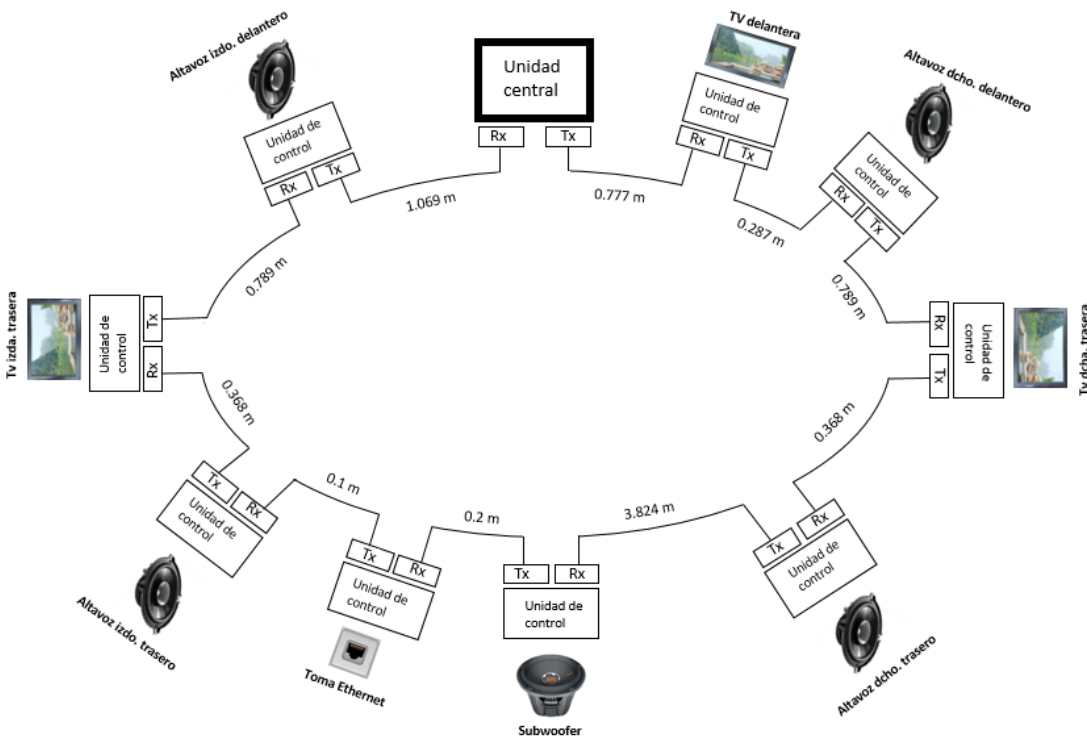


Figura 3.3: Topología del diseño

Mediante la suma de las distancias entre los dispositivos podemos obtener la distancia máxima que recorrerá la señal óptica:

$$L_{total} = 8.571m \tag{3.1}$$

Por lo que respecta al inventario de componentes que serán necesarios para el funcionamiento de la red, será necesario recordar que cada dispositivo va asociado a una unidad de control y que estas a su vez están compuestas por un transceptor y un microcontrolador. Además, en el caso de las unidades de control Ethernet, será necesario utilizar adaptadores USB-RJ45 con el fin de ofrecer una conexión estandarizada. Por tanto el inventario total para cada sistema es el siguiente:

Sistema de audio (Altavoces)	-5 transceptores ópticos -5 microcontroladores
Sistema de vídeo (Pantallas)	-3 transceptores ópticos -3 microcontroladores

Internet	-1 transceptor ópticos -1 microcontrolador -1 adaptador USB-RJ45
Unidad central	-1 transceptor óptico -1 microcontrolador

*Tabla 3.1: Inventario*

## 3.2. Componentes en el mercado

### 3.2.1. Transceptores

El transceptor **AFBR-1150L / AFBR-2150L** [8] se trata de un emisor y receptor óptico fabricado por Avago technologies y que permite sistemas con una tasa de transmisión máxima de 150 Mbit/s dentro de un rango de temperatura de -40°C a 95°C. En lo que respecta al transmisor, se trata de un LED a 650 nm para trabajar con fibras PMMA y el receptor se trata de un fotodiodo con preamplificador, postamplificador y digitalizador. El precio de este transceptor es de 30€ en [www.farnell.com](http://www.farnell.com).

Otro transceptor interesante podría ser el modelo **AFBR-5972Z** [9] de Avago, que se trata de un transceptor compatible con el estándar IEEE 802.3 (Ethernet) de hasta 100 Mbps para enlaces de 50m para fibras POF y que trabaja a una temperatura desde -40°C a 85°C. El transmisor se trata de un LED y un driver integrado que trabaja a 650 nm mientras que el receptor se trata de un fotodiodo PIN de silicio. El precio de este transceptor en [www.farnell.com](http://www.farnell.com) es de 24,20€ por unidad.

Por lo que respecta a transmisiones de mayor tasa de transmisión, Avago tiene el modelo de transceptor **AFBR-59F3Z** [10] utilizado para sistemas con una tasa de Gigabit a través de POF estándar. Además el mecanismo de conexión a la fibra innovador que incluye este transceptor hace que no sea preciso conectores. El transmisor es un LED similar a los utilizados en el resto de transceptores de 17 nm de ancho de banda trabajando en 650nm. Por lo que respecta al receptor, se trata de un fotodiodo PIN de silicio, todos estos datos para un enlace de 50m máximo. Uno de los inconvenientes de este transceptor, aparte de la necesidad de más potencia en el receptor, es la temperatura de trabajo que es desde 0 a 70°C, por lo que sería necesario un enfriador en el transceptor. El precio por unidad es de 23,94€ en [www.mouser.com](http://www.mouser.com).

Por último, destacar el modelo **AFBR-59F2Z** [11] que permite comunicaciones de hasta 200 Mbps sobre fibra POF sin la necesidad de conectores. El transmisor se trata una vez más de un LED de 17 nm de ancho de banda trabajando a 650 nm y el receptor se trata de un fotodiodo PIN de silicio. El rango de temperaturas de trabajo va desde -40°C hasta 85°C lo que lo hace idóneo para el uso en sistemas de automoción para enlaces de hasta 40m. El precio es de 23,94€ por unidad en [www.mouser.com](http://www.mouser.com).

### 3.2.2. Fibra óptica

En lo que respecta a la fibra nos centraremos en las fibras PMMA que son las que mejor rendimiento proporcionan para los sistemas automovilísticos y tienen mejor relación calidad/precio.

Por ejemplo, la marca Mitsubishi ESKA® ofrece gran variedad de tipos de fibra PMMA orientada a sistemas automovilísticos. **GHCP4001** [12], es un tipo de fibra SI-POF utilizada para enlaces punto a punto para transmisión de datos que tiene un precio de 0.7 € por metro en [www.i-fiberoptics.com](http://www.i-fiberoptics.com). Sus características principales son: índice de refracción del núcleo 1.49, apertura numérica 0.5 y diámetro de núcleo de 0.98mm. También cumple con el rango de temperatura para aplicaciones automovilísticas y tiene una atenuación máxima de 0.17 dB/m para una longitud de onda de trabajo de 650 nm a 25°C.

La especificación ESKA de Mitsubishi también consta de un modelo para entornos de temperatura variables, **BH2001** [13], que tiene un índice de 1.49 y una apertura numérica de 0.58. La característica destacable de este tipo de fibra es el rango de temperaturas desde -55°C a 105°C. En lo que respecta a la atenuación, es de unos 0.25 dB/m a 650 nm. Este modelo de fibra tiene un coste de 1.69€ por metro en [www.fiberopticpof.com](http://www.fiberopticpof.com).

Además, Mitsubishi, también tiene un tipo de fibra para comunicaciones vehiculares de gran ancho de banda, que puede ser interesante también y se trata de la fibra PMMA **MH4001** [14], que tiene un precio de 1.49€ por metro de fibra en [www.i-fiberoptics.com](http://www.i-fiberoptics.com) y que tiene unas características similares al modelo GHCP4001 pero con una apertura numérica de 0,3 y un ancho de banda a -3dB de 200 MHz para 650nm a 50m de enlace.

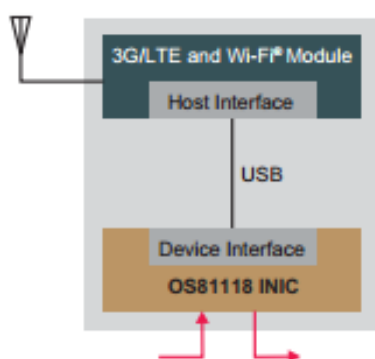
### 3.2.3. Microcontrolador

Una de las piezas importantes del sistema será el microcontrolador, el cual hace las funciones de gestión de los datos en las unidades de control del sistema. Uno de los más implementados en los últimos tiempos es el microcontrolador **OS81118** [15] que se trata de un chip que se encarga de regular las comunicaciones entre los dispositivos para poder realizar las transmisiones de datos y adaptando las diferentes formas de transmisión y recepción de datos (USB, I2C, SPI...) en sistemas automovilísticos.

El uso de este microcontrolador permite el total control de la arquitectura de red inteligente mediante un único microchip y mediante su puerto USB 2.0 de alta velocidad, el OS81118 dota de las capacidades necesarias para crear un sistema de aplicaciones en el automóvil y de conectividad Wi-Fi en el sistema en combinación con módulos 3G y Wi-Fi.

El microcontrolador permite el control de la red con una capacidad de hasta 150 Mbps y una capa física LED/POF o coaxial. Además, soporta los formatos de paquetes del arte actual de la industria como son paquetes de audio síncrono (PCM), paquetes de audio/vídeo asíncronos (MPEG, H-264), paquetes Ethernet o la distribución del reloj en la red.

Además es utilizado también en este tipo de redes como una solución ideal para proporcionar un gran nivel de flexibilidad para los diseñadores a la hora de crear las unidades centrales, permitiendo la utilización de los más actuales SoCs multi-core que tienen interfaz USB y que no tenían un interfaz estándar en soluciones automovilísticas y que ahora pueden ser incorporadas en la unidad central mediante el OS81118.



*Figura 3.4: Conectividad a internet mediante OS81118*

El precio de este tipo de microchip es de 12€ la unidad en [www.microchip.com](http://www.microchip.com).

### 3.3. Selección de componentes

La elección de los componentes a utilizar en el sistema y los criterios de selección que se seguirán para esto son dos aspectos relevantes en el diseño. En este caso, se seguirá un criterio de precio teniendo en cuenta, además, los requisitos de las aplicaciones a implementar en el automóvil, el balance de potencia y el balance de tiempos del sistema.

En primer lugar, nos centraremos en la elección del transceptor a utilizar. Descartaremos primeramente el modelo de transceptor AFBR-1150L/2150L debido a que no tienen un sistema para evitar conectores, los cuales incrementaría el coste del sistema y añadirían numerosas pérdidas, además, estos transceptores suponen un coste extra de aproximadamente 6€ por cada unidad en comparación con el resto de transceptores. Una vez hecho este descarte, desestimaremos también el transceptor AFBR-5972Z ya que teniendo unas características muy similares a los otros transceptores, permite una tasa de transmisión más reducida. Teniendo en cuenta únicamente los 2 transceptores que quedan, optaremos por el modelo **AFBR-59F2Z** [11] para nuestro sistema, ya que aunque el modelo AFBR-59F3Z puede proporcionar una tasa de transmisión muy alta, las condiciones de temperatura hacen que no sea propicio para ser utilizado en un sistema automovilístico, siendo necesario en ese caso un sistema de refrigeración que haría que se incrementara el precio total de la instalación. Además, este transceptor nos permitirá evitar el uso de conectores en las unidades de control de nuestro sistema. También cabe nombrar que se deberá colocar un transceptor en cada unidad de control del sistema y que cada unidad de control irá asociada a un dispositivo del coche.

Por lo que respecta a las características del transceptor elegido, AFBR-59F2Z, son las siguientes:

<u>LED</u>	
Pt	-6.5 dBm
$\lambda$	650 nm
NA de fibra recomendada	0.5
$\Delta\lambda$	17 nm
$T_{tx}$	1.2 ns
T°C	-40/85 °C
BER	2.5e-10

<u>Fotodiodo PIN</u>	
Sensibilidad	-21 dBm
$\lambda$	650 nm
NA de fibra recomendada	0.5
$\Delta\lambda$	17 nm
$T_{rx}$	1.1 ns
BER	2.5e-10

*Tabla 3.2: Características del fotodiodo*





**Figura 3.5: Transceptor AFBR-59F2Z**

Para la elección de la fibra, nos decantaremos por el modelo **Mitsubishi ESKA GHCP4001** [12], ya que aunque nos permite una tasa de transmisión menor que el modelo MH4001, su precio es bastante menor y el resto de características son bastante similares.

En las fibras multimodo el factor dominante que limita el ancho de banda es la dispersión modal. Para saber el ancho de banda que nos permite la dispersión en la fibra, se obtendrá a partir de la siguiente fórmula:

$$B \leq \frac{2 \times n_2 \times c}{L \times NA^2} = \frac{2 \times 1.4 \times 3e8}{7.616 \times 0.5^2} = 441 \text{ MHz} \quad (3.2)$$

Algunas características de la fibra seleccionada son las siguientes:

**Fibra Mitsubishi ESKA GHCP4001**

Tipo	SI-PMMA (Step Index PMMA) multimodo
NA	0.5
Índice de refracción del núcleo	1.49
Atenuación máxima	0.17 dB/m
$\Delta f$ máximo	441 MHz
Diámetro de núcleo	0.98 mm
Diámetro cubierta	1 mm
Diámetro sobrecubierta	2.2 mm
Material núcleo	PMMA
Material cubierta	Polímero fluorado
Material sobrecubierta	Polietileno clorado

**Tabla 3.3: Características de la fibra**



*Figura 3.6: Fibra GHCP4001*

Además de los transmisores, los receptores y la fibra, se tendrá que incluir en el diseño un microcontrolador que hará las veces de CPU en las unidades de control de nuestros dispositivos. El microcontrolador seleccionado será uno de los más utilizados en el mercado y se trata del chip **OS81118** [15].



*Figura 3.7: Chip OS81118*

Por último, cabe tener en cuenta incluir en los componentes adaptadores RJ45-USB. La utilización de estos dispositivos se justifica dado que los microcontroladores utilizados en el sistema, OS81118, soportan interfaz USB, no RJ45 y dado que los dispositivos actuales como puede ser un PC tiene la toma de conexión de red mediante conexión RJ45, es muy útil este dispositivo con el fin de poder conectar cualquier dispositivo a las tomas USB de las unidades de control dedicadas a Ethernet.

El adaptador de red USB Rankie [16] cumple de sobra las condiciones necesarias, siendo un adaptador de USB 3.0 a Gigabit Ethernet compatible con 10 y 100 Mbps económico. El precio de estos dispositivos es de 11,95€ en [www.amazon.es](http://www.amazon.es).



*Figura 3.8: Adaptador USB-RJ45*

## 3.4. Funcionamiento y evaluación

### 3.4.1. Descripción del sistema

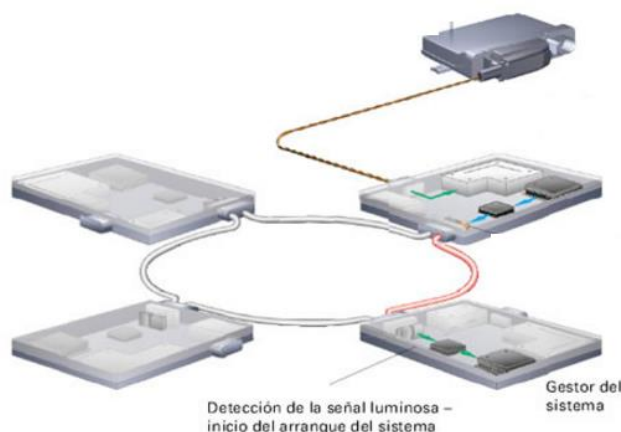
El sistema constará de un bus de datos óptico implementado con una topología en anillo en la cual habrá un elemento principal: la unidad central. Desde la unidad central, a través de un display central, se podrá configurar las salidas de audio de todo el automóvil, las salidas de vídeo para las diferentes pantallas del coche y el acceso a internet en el coche, ya que esta unidad central se encargará de gestionar la señal LTE que llegue al automóvil y que se transmitirá a través de la fibra. Además, en la unidad central se encuentran todas las entradas de audio (USB, cable Jack...) y de vídeo (DVD, blueray...).

Además de este elemento, también dispondremos de las unidades de control, donde se encuentra el transceptor, el microcontrolador y los elementos de los diferentes dispositivos necesarios para gestionar la información que llega por el anillo de fibra.

En lo que respecta a la entrada de señal LTE existen numerosas opciones como puede ser la toma de datos a través de una tarjeta de red o la inclusión de un router como se ha comenzado a experimentar en los últimos años en sistemas automovilísticos con el fin de proporcionar una red completa.

### 3.4.2. Funcionamiento

La comunicación entre las unidades de control, que a su vez están conectadas a los diferentes dispositivos del automóvil, puede observarse en la Figura 3.9, donde se ha transmitido una información desde la unidad central del automóvil en un sistema MOST convencional. Esta información se procesa en el gestor de la aplicación y a través de la CPU, para ser transmitida desde el transceptor al LED y ser enviada a través del bus óptico (fibra óptica) al dispositivo al que iba dirigido, el cual lo procesa en la CPU y ejecuta la acción correspondiente. Además, en caso de que la información no vaya dirigida al dispositivo al que le ha llegado la información, esta no llega a ser procesada por la CPU y es retransmitida al anillo a través del transceptor.



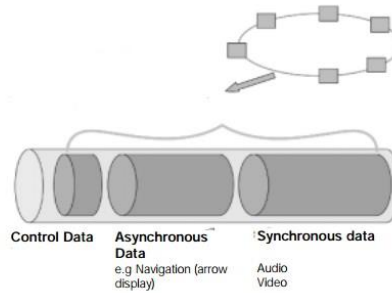
*Figura 3.9: Ejemplo de comunicación entre unidades de control (topología en anillo)*

Para la recepción de la señal óptica se va a optar por una detección directa que consta de un preamplificador y un fotodiodo que transforma la potencia óptica directamente en una corriente eléctrica proporcional a ella, resultando un sistema sencillo y de bajo coste en comparación con la detección coherente que permitiría recuperar la información de fase de la portadora con el fin de realizar un tratamiento de los datos que no será necesario en el caso de nuestro sistema.

Por lo que respecta a la inicialización del sistema, una vez que se ha realizado el arrancado del automóvil y se suministra energía eléctrica al sistema automovilístico, se crea una relación de comunicación desde la unidad central a los diferentes dispositivos del sistema con la finalidad de comprobar que todos los

elementos funcionan correctamente, preguntándole a los diferentes elementos su bloque de funciones en el sistema (CD player, amplifiers...) y asignándole una posición de nodo en el sistema y una dirección lógica a partir de la dirección del inicio del anillo que será la correspondiente al TimingMaster del sistema. Una vez que se ha realizado una inicialización correcta, el sistema está preparado para funcionar correctamente.

La transmisión de los datos se realizará cada, aproximadamente, 300  $\mu$ s empaquetando todos estos en mensajes de 64 bytes que se irán desgranando al paso por las diferentes unidades de control del anillo, que obtendrán los datos que contengan información de la dirección asignada a cada una de ellas y retransmitiendo al anillo la información no asignada a esa dirección [2].



**Figura 3.10: Paquete de datos**

En caso de que se diera algún conflicto en el sistema de inicialización o durante la transmisión de los datos, se debería dar un mensaje de error y se debería inicializar un sistema de escaneo (por ejemplo, MOST Ring Break Diagnosis) para localizar el error en el sistema.

El sistema, totalmente sincronizado, permitirá ver un video en cada display del automóvil con su propio audio, el cual tendrá su salida mediante una conexión Jack para auriculares. Además, desde el display central se podrá gestionar el audio de los amplificadores del coche que será independiente también de los displays. Todo esto dotará al automóvil de un sistema de entretenimiento individualizado dentro del automóvil y de facilidades a la hora de la conducción.

### 3.4.3. Evaluación

Para que todo el sistema funcione correctamente se deberá cumplir unos criterios de ancho de banda/tasa de transmisión, así como cumplir con el balance de potencia.

Dada la topología del sistema, en el cual se regenera la señal en cada paso por las unidades de control, el ancho de banda vendrá dado por el límite impuesto por los transceptores, que es de unos 100 Mbps.

Para comprobar finalmente que el sistema es viable, procederemos a realizar el balance de potencia del sistema. En primer lugar, se realizará la siguiente suposición automovilística: la unidad central del sistema se colocará al lado del volante del conductor en la parte central delantera del coche.

Como se ha comentado antes, la topología del sistema permite una regeneración de la señal a cada paso por las unidades de control del mismo, por lo tanto el balance de potencia se limita al enlace punto a punto en el cual haya una distancia mayor y teniendo en cuenta que los transceptores no requieren conectores, dado que tienen la tecnología insert and lock que evita el uso de estos. El balance de potencia será el siguiente:

$$Pt(dBm)[11] - L_{total}(m) \times \text{atenuación} \left( \frac{dB}{m} \right) - MS(dB) \geq \text{Sensibilidad del receptor}[11] \quad (3.3)$$

$$-6,5 - 3,824 \times 0,19 - 3 \geq -21 \rightarrow -10,22 \text{ dBm} \geq -21 \text{ dBm} \quad (3.4)$$

Podemos observar en la ecuación 3.4 que se cumple holgadamente el balance de potencia y el sistema óptico es óptimo para el buen funcionamiento del sistema.

#### 3.4.4. Prestaciones

La modulación elegida para implementar en el driver del LED será 3-PAM, ya que es una modulación eficiente en LEDs y sistemas ópticos en general, y además es ampliamente usada por el estándar de Ethernet 100 Base-Fx. Se ha optado por esta modulación ya que es la más simple de implementar de las 3 y la tasa de transmisión es más que suficiente para nuestras aplicaciones. Teniendo esto en cuenta y dado que la limitación de tasa de transmisión vendrá dada por los transceptores a unos 100Mbps, el reparto de la velocidad de transmisión en el sistema quedará de la siguiente forma:

Sistema	Tasa de datos
Audio	20 Mbps
Vídeo	65 Mbps
Ethernet	15 Mbps

*Tabla 3.4: Requerimientos de tasa de transmisión*

#### 3.4.5. Presupuesto

Uno de los aspectos más importantes de todo sistema tecnológico es el presupuesto invertido en él y que este se amolde al coste total del sistema en el que se integre. Con el fin de poder comparar posteriormente el coste del sistema con modificaciones de este como puede ser la implementación de la tecnología WDM se procederá a hacer un presupuesto teniendo en cuenta la selección de componentes realizada en el apartado 3.3.

A continuación, se puede observar en la tabla 3.5 y en la que se realiza un cálculo del coste de cada componente del sistema diseñado así como el precio total del sistema óptico completo.

Para realización del presupuesto se ha tenido en cuenta que se un transceptor y un microcontrolador para cada dispositivo del sistema, incluida la unidad central. Así mismo, como se comentó anteriormente, es necesario un adaptador USB-RJ45 para la señal Ethernet. Por último se ha destino los suficientes metros de fibra para que la señal pueda llegar a todos los dispositivos.

Componente	Cantidad/Longitud (m)*	Precio por componente (€)/precio por metro (€)*	Precio por tipo de componente (€)
Transceptor AFBR-59F2Z	10	23,94	239,4
Microcontrolador	10	12	120
Fibra óptica*	8,571	0,7	6
Adaptador USB-RJ45	1	11,95	11,95

<b>Precio total del sistema</b>	<b>377,35</b>
---------------------------------	---------------

*Tabla 3.5: Presupuesto del sistema*

### 3.4.6. Consumo de potencia

Por último, realizaremos un cálculo estimado del consumo de potencia del sistema en base a los datos proporcionados por los catálogos de los transceptores y microcontroladores usados en el enlace diseñado. Para establecer un escenario concreto y posteriormente poder realizar una comparación, consideraremos el total de consumo del sistema como la suma de la potencia consumida por cada una de las unidades de control y la unidad central, para una transmisión simple como podría ser el envío de una señal de video a las televisiones.

En la tabla 3.6 se puede observar el cálculo en términos de consumo del sistema.

Componente	Cantidad	Consumo por unidad (W)	Consumo de los componentes (W)
Transceptor	10	0,137	1,37
Microcontrolador	10	0,1	1

Consumo total (W)	2,37
-------------------	------

*Tabla 3.6: Consumo*

### 3.4.7. Conclusiones

Durante el punto 3.4 se ha realizado el diseño de un sistema de fibra óptica de plástico para su implementación en los sistemas de automoción, tomando como modelo el sistema MOST150, aprovechando las propiedades que proporcionan las fibras PMMA así como los LEDs y fotodiodos pin de silicio.

Tras un análisis en términos de prestaciones, coste y consumo de potencia se puede concluir que el sistema cumple perfectamente los requerimientos de tasas de transmisión necesarias para el correcto funcionamiento de los sistemas de audio, vídeo y Ethernet en la actualidad, utilizando estándares que proporcionan una calidad de servicio media (vídeos HD, audio DTS...). Cabría tener en cuenta que en caso de introducir dispositivos que requieran mayores tasas o un número mayor de elementos en el anillo el ancho de banda que puede proporcionar este tipo de sistema sería escaso.

Además, tras haber realizado un presupuesto del sistema óptico completo se puede observar que el sistema tiene un coste muy asequible a razón del presupuesto que tienen los vehículos de gama alta que suelen implementar este tipo de sistemas de entretenimiento y ayuda a la conducción (30.000-50.000 €), lo que supone que los sistemas LED-PMMA abaratarían el coste total del vehículo así como el coste de producción dada la facilidad de instalación de estos.

Por último, resaltar que debido a la topología y funcionamiento del sistema, en el cual los paquetes de datos se van retransmitiendo de una unidad de control a otra hasta llegar al dispositivo requerido y teniendo que pasar por el resto de unidades de control para volver a la unidad central, cerrando el anillo, el sistema tiene un consumo en exceso, consecuencia de la utilización completa del sistema para una transmisión simple a un elemento.

Tras todo el análisis realizado se puede concluir que el diseño cumple con los requerimientos mínimos necesarios para tener un sistema que abastezca al usuario de una red de entretenimiento completo en el automóvil, económico y con unas prestaciones suficientes para ofrecer los servicios requeridos en este tipo de sistemas en la actualidad. Con el fin de ver más allá e intentar mejorar este tipo de redes, se va a realizar el estudio del sistema añadiendo la tecnología WDM y observando que ventajas puede ofrecer y, a cambio, que inconvenientes supondrá utilizar una tecnología como es WDM que aún está en desarrollo para redes POF y no es utilizada en la actualidad para este tipo de aplicaciones.

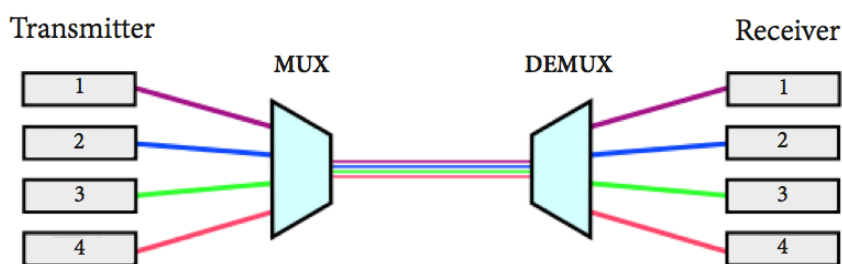
## Capítulo 4. Propuesta de sistema WDM para vehículos

### 4.1. Introducción

Como se ha comentado anteriormente, las numerosas ventajas que proporcionan las fibras ópticas de polímero, como flexibilidad, bajo coste, poco peso o radio de curvatura pequeño, hacen que sean muy atractivas como medio de transmisión de datos. Hasta ahora se ha estado utilizando para comunicaciones de datos de poca distancia, sistemas de automoción o aeronáutica, debido a que su atenuación en el rango de menor atenuación de la fibra es considerablemente mayor que el de otro tipo de fibras como las de vidrio, lo que hace que se limite su uso a unos 100m.

Quizás uno de los mayores inconvenientes de las POF es el poco ancho de banda que pueden proporcionar en comparación con otros medios como los cables de cobre, y que se debe a la gran dispersión intermodal, lo que se traduce en una reducción considerable de la capacidad del sistema.

La solución más prometedora que se ha encontrado para subsanar estos problemas se trata de la tecnología WDM, wavelength division multiplexing, que permite la transmisión de varios canales ópticos simultáneamente. Mediante el uso de múltiples portadoras ópticas para transmisiones paralelas de canales de datos se puede conseguir una capacidad mucho mayor del sistema, exprimiendo al máximo el espectro y consiguiendo un sistema mucho más potente.



*Figura 4.1: Ejemplo básico WDM*

Habitualmente, los LEDs han sido la fuente óptica usada para los sistemas POF, ya que son dispositivos baratos y encajan perfectamente con la apertura numérica típica de 0,5 y el gran núcleo de las fibras de polímero. Sin embargo, el ancho de banda de los LED está restringido a 200 MHz aproximadamente lo que limitaría considerablemente la capacidad de los sistemas WDM, por tanto, y para exprimir al máximo esta tecnología, es importante la sustitución de los LEDs por diodos láser.

Un aspecto importante es el hecho de que hasta ahora no se estaba manufacturando diodos láser en el rango visible debido a que este rango no era utilizado en los sistemas ópticos de comunicaciones. Por tanto el primer paso para conseguir implementar este tipo de redes es desarrollar diodos láser en este rango de longitudes de onda, y son grandes los avances en el desarrollo y manufacturación de los láseres en los últimos años, encabezados por empresas como Sanyo, Arima, Osram u Opnext.

El siguiente paso en el proceso de implementación de WDM en redes POF, es la comercialización de los elementos ópticos pasivos necesarios para la multiplexación y demultiplexación de los canales ópticos. Los Mux/Demux son elementos básicos en WDM y se necesitan estos elementos para las SI-POF, que por su rango espectral, ancho de banda y características físicas no pueden ser utilizados los ya comercializados elementos para fibras de vidrio o para las fibras POF de índice gradual de baja apertura numérica.

## 4.2. Canales en DWDM, CWDM y sistemas con SI-POF

La ITU-T recoge en diferentes artículos como el G.694.1 la canalización del espectro para aplicaciones DWDM, dens WDM, y que cubre un rango de frecuencias desde los 1611.79nm a los 1490.50nm con unos espaciados de canal de 0.8nm, 0.4nm, 0.2nm y 0.1nm. Dado el poco espaciado de canales, es necesario un control muy preciso de la temperatura de los láseres en redes de un alto nivel de jerarquía como redes backbone de gran capacidad.

Por lo que respecta a los sistemas CWDM, coarse WDM, la ITU-T también regula en el artículo G.694.2 la canalización para este tipo de sistemas. Esta especificación recoge un espaciado de canal de 20nm y abarca 18 longitudes de onda entre los 1271nm y los 1611nm. Este espaciado permite diseño de sistemas más flexibles, gracias la utilización de láseres sin enfriadores y MUX/DEMUXs de gran ancho de banda [17].

Ch. No.	1	2	3	4	5	6
$\lambda$ [nm]	1271	1291	1311	1331	1351	1371
Ch. No.	7	8	9	10	11	12
$\lambda$ [nm]	1391	1411	1431	1451	1471	1491
Ch. No.	13	14	15	16	17	18
$\lambda$ [nm]	1511	1531	1551	1571	1591	1611

Figura 4.2: Grid WDM según G.694.2

Para el caso de los sistemas POF, tendremos que tener en cuenta una serie de consideraciones a la hora de establecer canales de comunicación. En primer lugar, se deberá estimar una distribución de canal acorde a la atenuación espectral de las fibras SI-POF. En segundo lugar se tendrá que tener en cuenta las características de las diferentes soluciones MUX/DEMUX y, por último, la disponibilidad de fuentes ópticas en el rango visible.

Para determinar los canales para la transmisión de datos en SI-POF se debe localizar la zona de mínima atenuación. La atenuación espectral en las SI-POF tiene mínimos en 476nm, 522nm, 568nm, y 650nm, produciéndose un incremento muy grande de atenuación alrededor de 650nm, por tanto, se deberá colocar un canal muy cercano a 650nm y un rango de canales adecuadamente espaciados cerca de 569nm, 522nm y 476nm. El rango de canales se establecerá desde los 400nm a los 700nm, donde las SI-POF ofrecen una atenuación aceptable [17].

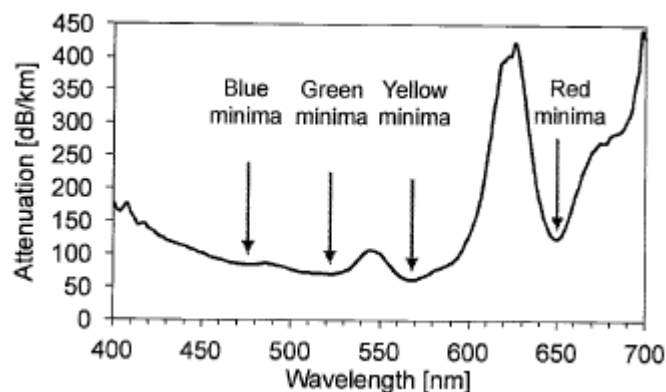


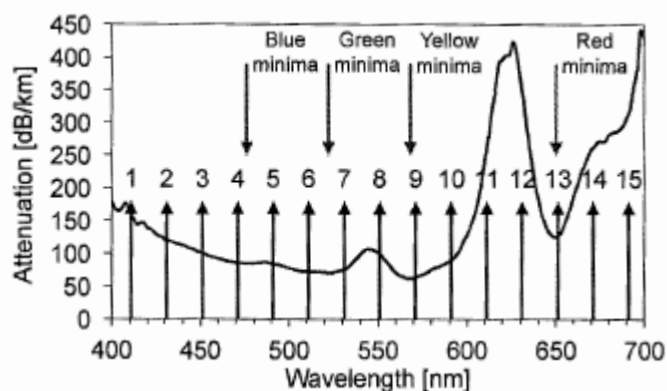
Figura 4.3: Atenuación espectral en las SI-POF



Se podrán tomar varias alternativas a la hora de establecer los canales para el rango visible, como extender la canalización DWDM al rango visible, extender la canalización CWDM o realizar canales nuevos.

En primer lugar se podrá descartar la extensión DWDM al visible por sus propias características de espaciado que establece un número de canales excesivo para las demandas actuales de WDM en el rango visible.

Una alternativa bastante interesante sería la extensión del CWDM al rango visible, que resultaría en 15 canales entre 400nm y 700nm, aunque no se podrían evitar canales en la zona de atenuaciones más altas, pero con canales en los mínimos citados como en 471nm, 511nm, 571nm y 651nm. Es interesante observar que se tiene un canal muy cercano a 650nm, lo que es muy importante ya que la mayoría de los sistemas actuales SI-POF utilizan la longitud de onda de 650nm. Esta opción es muy propicia a ser utilizada dada su buena localización de canales, la densidad de canal y la disponibilidad de láseres en esos rangos [17].



Ch. No.	1	2	3	4	5	6
$\lambda$ [nm]	411	431	451	471	491	511
$f$ [THz]	729	696	665	637	611	587
$L$ [dB/km]	158	120	100	85	84	72
Ch. No.	7	8	9	10	11	12
$\lambda$ [nm]	531	551	571	591	611	631
$f$ [THz]	565	544	525	507	491	475
$L$ [dB/km]	75	99	63	89	259	349
Ch. No.	13	14	15			
$\lambda$ [nm]	651	671	691			
$f$ [THz]	461	447	434			
$L$ [dB/km]	126	261	313			

Figura 4.4: Grid CWDM trasladado a VIS

Por último, cabría tener en cuenta nuevas canalizaciones que se amoldaran a la atenuación espectral de las SI-POF, así como a las características actuales del mercado que permitieran su implementación en los nuevos sistemas POF. Es interesante, además, conocer que tipos de fuente de transmisión disponibles actualmente en lo que a tecnología láser se refiere.

El sistema WDM debe ser capaz de realizar transferencias de datos con unos datarates elevados, lo que conlleva a la utilización de potencias altas así como de altas velocidades. Por esta razón y al contrario de lo que ocurría en la tecnología LED, donde había LEDs disponibles prácticamente en todo el rango visible, para la tecnología láser solo se encuentran disponibles actualmente en el mercado a gran escala algunas longitudes de onda: 405nm, 450nm, 488nm, 520nm y 650nm. Dadas estas limitaciones, los sistemas WDM-POF, en la mayoría de casos, se basaran en transmisiones de hasta 4 o 5 canales como máximo. Algunas características básicas de los 4 láseres utilizados por la Universidad de Harz en la realización de un sistema WDM-POF de alta velocidad se muestran en la Figura 4.5 [17]:

Ch. No.	1	2	3	4
Type Name	DL-5146-101S	PL 450B	/	HL6544FM
Manufacturer	Sanyo	Osram	/	Opnext
$\lambda_{\text{peak}}$ [nm]	405	450	520	660
$I_{\text{th}}$ [mA]	35	30	60	60
$I_{\text{bias}}$ [mA]	70	100	160	115
$P_{\text{op}}$ [mW]	40	80	50	50
Housing	TO-56	TO-38	TO-38	TO-56
Commercially available	yes	yes	no	yes

Figura 4.5: Características de los láseres utilizados por la Universidad de Harz

### 4.3. Demultiplexación de la señal WDM

En los dos últimos años, se han realizado numerosas investigaciones de redes POF para capacidades de hasta 21 Gbps en transmisiones de hasta 50m, donde los multiplexores y demultiplexores se basan principalmente en sistemas de bloque formados por filtros thin-film, prismas y redes de difracción [4].

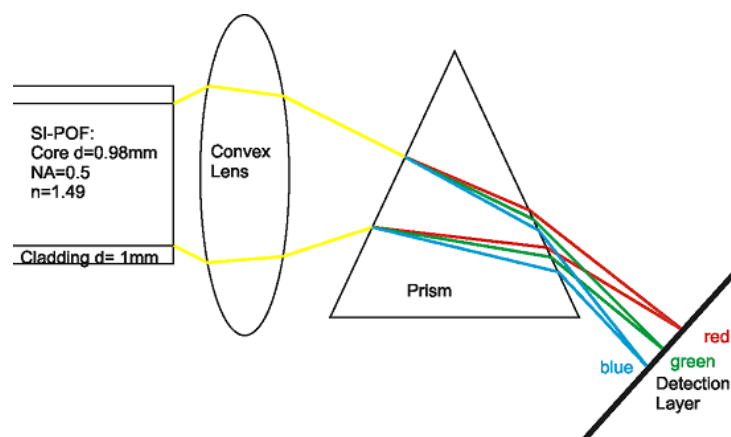
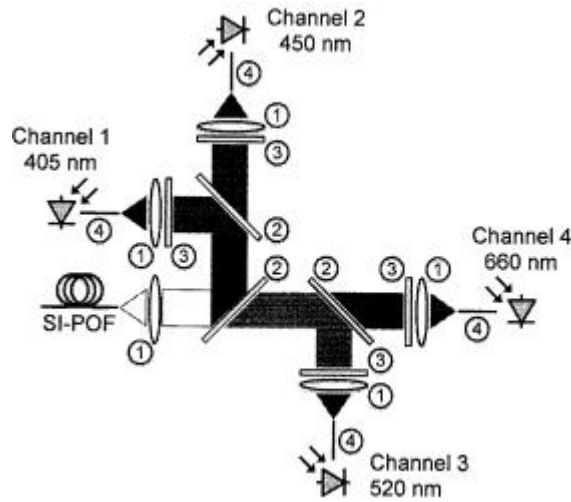


Figura 4.6: Funcionamiento de un prisma como demultiplexor

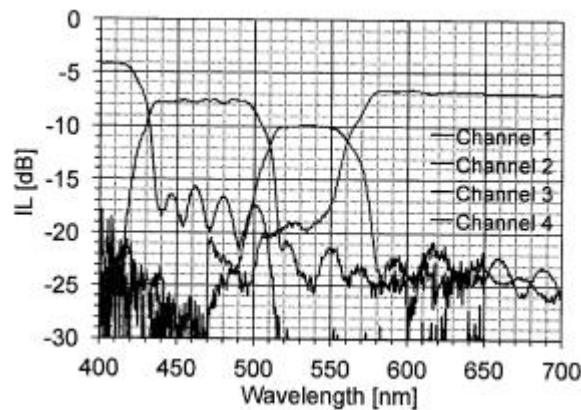
Una de las opciones barajadas se trata de utilizar tecnología de prismas ópticos para conseguir un DEMUX de bajas pérdidas en condiciones de laboratorio. El sistema presentado en la Figura 4.7, ha sido diseñado por la universidad de Harz y se trata de un demultiplexor de 4 canales.

El haz multicanal que excita la fibra es colimado, se transmite y refleja parcialmente en los espejos hasta que el canal deseado llega a los filtros donde se reduce el cross-talk, filtrando la luz sobrante de los otros canales. El canal filtrado es finalmente introducido en la fibra que llega al correspondiente fotodiodo. [17]



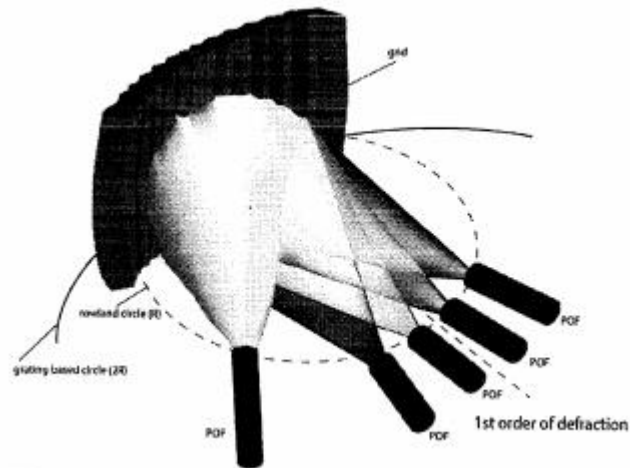
*Figura 4.7: Demultiplexor de 4 canales (1-lentes; 2-espejo dicrónico; 3-filtro thin-film)*

La función de transferencia de este sistema se muestra en la Figura 4.8, donde se puede concluir que se puede llegar a unas pérdidas de inserción menores de 7 dB y un crosstalk de menos de -30 dB.



*Figura 4.8: Función de transferencia del demultiplexor de 4 canales*

Otro demultiplexor interesante se basa en redes de difracción y se puede observar en la Figura 4.9. En primer lugar, el haz divergente de luz que sale de la fibra debe ser enfocado, para esto será utilizado un espejo cóncavo para evitar las aberraciones esféricas. En segundo lugar, se debe separar el haz en las diferentes longitudes de onda que se transmiten y que se realizaría mediante redes de difracción. Estos dos primeros pasos se pueden agrupar colocando la red de difracción en el espejo, evitando cualquier tipo de atenuaciones. Por último, se debería colocar fibras de salida en los diferentes haces o detectores en array con el fin de detectar las diferentes longitudes de onda. [17]



*Figura 4.9: Demultiplexor basado en redes de difracción*

#### 4.4. Estado actual de los sistemas WDM-POF

Las últimas investigaciones en el ámbito de las redes POF en WDM, han demostrado que es posible conseguir una transmisión de datos sobre SI-POF de 21.4 Gbps, con un BER de  $10^{-3}$  basada en la utilización de 6 láseres operando en 405 nm, 442 nm, 459 nm, 490 nm, 515 nm y 655 nm. La multiplexación se basa en un acoplador 1:6 mientras que la demultiplexación se basa en una red de difracción plana y unos fotodetectores pin de silicio de un ancho de banda de 700 MHz. Por lo que respecta a la modulación empleada, se propone un sistema DMT, Discreet Multitone Modulation, con 256 subportadoras moduladas a su vez con un formato de modulación 16-QAM sobre un ancho de banda de 1 GHz y considerando un overhead del 7% para la corrección de errores [4].

Este estudio muestra que mediante el uso de WDM para la transmisión de datos en paralelo en el rango visible de la luz es posible conseguir un sistema de banda ancha en el hogar o redes de interconexión ópticas de alta velocidad de hasta 21.4 Gbps mediante la modulación adecuada, lo que permitiría subsanar la tendencia creciente de tasas de transmisión en las redes locales en el hogar mediante la aparición de tecnologías como la IPTV que podrían ser gestionadas en el futuro por redes ópticas basadas en fibras POF.

A la vista de los resultados de investigaciones como la planteada, es interesante tomar como modelo para trasladar las características de este tipo de sistemas al ámbito de los sistemas POF en los automóviles, con la finalidad de dotar al automóvil de un sistema más robusto y potente que permitiría aumentar notablemente la capacidad de las redes ópticas POF utilizadas actualmente en el sector de la automoción.

#### 4.5. Planificación multifrecuencia

Con el fin de proporcionar al sistema monocanal diseñado en este trabajo de un incremento en la eficiencia técnica del equipo de comunicación, se propone la tecnología WDM junto con una serie de modificaciones sustanciales en la topología del diseño anterior, introduciendo esta tecnología ampliamente extendida en el rango de comunicaciones infrarrojas a las fibras ópticas de plástico.

Como se ha explicado en el punto 2.2.2, las fibras POF tienen sus mínimos de atenuación en el rango visible de las longitudes de onda, hecho que hace propicio utilizar los diferentes colores disponibles en ese rango como diferentes transmisores. Asignando un color a cada aplicación del sistema (audio, vídeo y Ethernet). Este hecho nos permitirá tener 3 veces más ancho de banda en el sistema que antes, aprovechando al máximo la fibra.

Tras contemplar diferentes opciones en el diseño del sistema WDM se ha tomado la decisión de realizar la transmisión de datos mediante tecnología de diodo láser, ya que, como se expuso en el punto 2.3.3, ofrece una potencia mayor de emisión que será necesaria para poder solventar la introducción de sistemas ópticos pasivos necesarios para el sistema WDM y que tienen unas pérdidas considerables.

En el diseño, se utilizarán 3 láseres para la transmisión de los datos a los diferentes dispositivos del sistema, utilizando dispositivos dentro de lo ofertado en el mercado, que se amolden a los requerimientos necesarios para el sistema como puede ser la utilización de las bandas de mínima atenuación de las fibras POF, que se encuentran en el rango visible de longitud de onda. Las longitudes de onda utilizadas van a ser 450nm, 488nm y 520nm donde la atenuación en las SI-POF es muy baja, para aprovecharlo y realizar una transmisión de los datos mediante láseres, más rápida que los LEDs ya que son modulables a más de 100 Mbps.

Los receptores utilizados serán fotodiodos pin de silicio y se buscará aquellos que permitan una sensibilidad más baja con el fin de subsanar las pérdidas totales del sistema, sobre todo en los últimos elementos a los cuales llegará una potencia más baja.

En lo que respecta a la multiplexación y demultiplexación del sistema es donde más habrá que hacer hincapié a la hora de pensar su realización. Las tecnologías utilizadas en los multiplexores y demultiplexores ópticos para fibra óptica de plástico son complicadas y están aún en desarrollo, utilizando sistemas de bloque en la mayoría de casos, como ya se ha estudiado, por lo que los elementos que existen en el mercado son muy costosos. Ante este problema se buscará realizar la multiplexación mediante un acoplador 3x1 y la demultiplexación se realizará mediante un sistema de demultiplexado realizado con circuladores y redes de difracción de bragg.

Por tanto el siguiente paso a realizar es encontrar los elementos necesarios para el diseño WDM en el mercado actual, intentando encontrar los elementos más económicos que puedan realizar las funciones necesarias para el correcto funcionamiento de la red óptica.

## 4.6. Componentes en el mercado

### 4.6.1. Láseres

En la tabla 4.1 se puede observar los elementos encontrados en el mercado con sus principales características. Como se ha comentado anteriormente, con el fin de conseguir un sistema robusto y con mayor capacidad, se ha optado por tomar como medios de transmisión diodos láser, los cuales tienen una potencia mucho mayor que los LED y unos tiempos de respuesta muy bajos que nos permite subsanar, en parte, las enormes pérdidas que se producen por la inclusión de elementos necesarios para la multiplexación y demultiplexación de la señal WDM y también permite obviar los tiempos de respuesta, que nos elevará enormemente el ancho de banda del sistema prácticamente al límite permitido por la fibra óptica.

Además se ha optado por láseres muy estrechos con el fin de evitar el solapamiento en los espectros, además de evitar interferencias en los elementos pasivos como los circuladores o FBGs. Todos los láseres permiten un ancho de modulación muy elevado pero a un coste más elevado que en los transceptores del diseño monocanal, donde teníamos emisor y receptor y cuyo precio rondaba los 24 €.

Modelo	Long. onda (nm)	Ancho espectral (nm)	Potencia (mW)	Ancho modulación (MHz)	Precio (€)	Proveedor
OSRAM PL-450B[18]	450	2	120	>100 MHz	38,33	www.mouser.com

OSRAM PLT5- 488[19]	488	2	60	>100 MHz	39	www.electrocomponents.com
OSRAM PL- 520[20]	520	2	50	>100 MHz	48,47	www.osram.com

*Tabla 4.1: Características de los láseres*

#### 4.6.2. Fotodiodos

Por lo que respecta a los fotodiodos que se colocarán en cada una de las unidades de recepción, se utilizará el modelo **MTD5052W** [21] de Marktech para la longitud de onda de 520 nm, el cual tiene una sensibilidad de -20 dBm y un precio de 6,88 € en [www.digi-key.com](http://www.digi-key.com).

Para detectar las otras dos longitudes de onda se utilizará el fotodiodo pin de silicio **S7797** [22] de Hamamatsu, que tiene una sensibilidad de -22,5 dBm para 450 nm y de -22,7 dBm para 488 nm, con un precio de 8,21 € en [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com).

#### 4.6.3. Circuladores

Tras una búsqueda exhaustiva de circuladores que sean compatibles con los sistemas de fibra plástica, se utilizarán los circuladores de 3 puertos suministrados por [www.ascennta.com](http://www.ascennta.com) cuyas pérdidas son de 2,2 dB y que tienen un abanico de longitudes de onda que va desde los 400 nm hasta los 1064 nm [23].



*Figura 4.10: Circulador Ascentta*

#### 4.6.4. Acoplador

Para realizar la multiplexación de las 3 longitudes de onda se tendrá que utilizar un acoplador 3x1 con tecnología de fusión compatible con fibra POF. El acoplador elegido tiene unas pérdidas de 5,27 dB (4,77 dB de pérdidas de inserción y 0,5 dB de pérdidas de exceso).

Además, para el duplexado de la señal Ethernet se utilizarán 2 acopladores 2x1 más, que introducirán unas pérdidas de 3,95 dB (3,5 dB de pérdidas de inserción y 0,45 de pérdidas de exceso). Estos acopladores podrán ser encontrados en [www.i-fiberoptics.com](http://www.i-fiberoptics.com) [24].

#### 4.6.5. Red de difracción de Bragg

Este elemento aún en investigación para tecnología POF, dada la tardía investigación de la fotosensibilidad de las fibras POF, sobre los años 90, por la longitud de onda utilizada y el ancho de los láseres de unos 2 nm, es útil en el sistema al permitir reflejar un porcentaje de la señal de una longitud de onda concreta que utilizaremos en recepción, mientras que dejará pasar el porcentaje restante para que la señal avance al siguiente nodo del anillo.

Las redes de Bragg se tratan de microestructuras que suelen tener una longitud de unos pocos de milímetros y que se pueden fotoinscribir en el núcleo de una fibra, iluminando de forma transversal la fibra con un haz de láser ultravioleta y empleando una máscara de fase para crear un patrón de interferencia en el núcleo de la fibra, lo cual induce un cambio permanente en las características físicas de la fibra. Este cambio consiste en una modulación periódica espacial del índice de refracción del núcleo, que produce una estructura resonante [25].

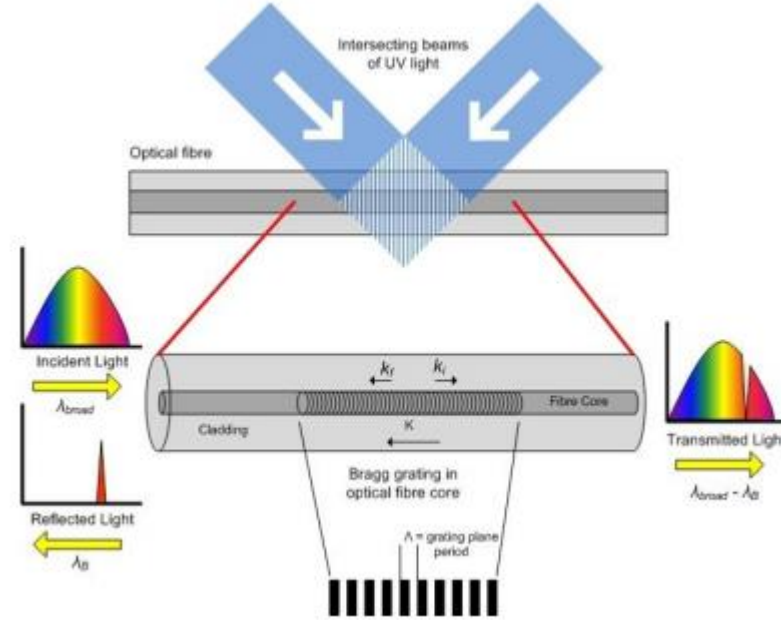


Figura 4.11: Esquema de una FBG en una FO

Si el rayo incidente que se guía a través de la fibra está en desfase con los planos de difracción, no se dará ninguna reflexión, mientras que si la señal está en fase con los planos, se producirá una señal reflejada a una longitud de onda determinada llamada longitud de onda de Bragg y que se rige por la siguiente fórmula:

$$\lambda_{bragg} = 2 \times n_{eff} \times \Lambda \quad (4.1)$$

En la fórmula 4.1  $n_{eff}$  se refiere al índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra en la FBG y  $\Lambda$  el período de la variación de índice de refracción.

Otro parámetro importante a la hora de definir las FBGs es la reflectividad máxima, que viene dada por las siguientes fórmulas, donde  $L$  es la longitud de la FBG:

$$R_{max} = \tanh^2(\kappa L) \quad (4.2)$$

$$\kappa = \frac{\pi \times \Delta n}{\lambda} \quad (4.3)$$

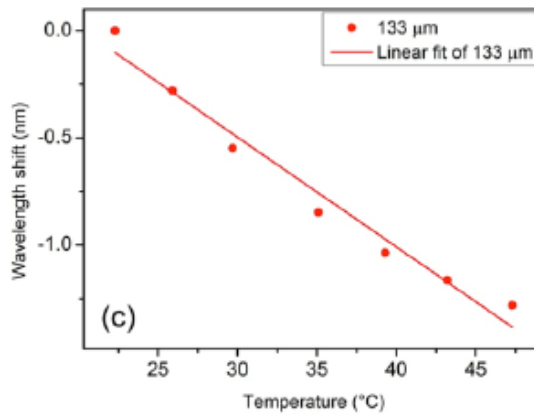
Además, el ancho de banda de la respuesta de las redes de difracción es importante a la hora de saber qué tipo de fuentes utilizar y las posibles penalizaciones de potencia que se podría sufrir por ello. El ancho espectral de las FBGs se puede modelar como:

$$\frac{\Delta \lambda_o}{\lambda} = \frac{\delta n_{eff}}{n_{eff}} \times \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_{bragg}}{\delta n_{eff} \times L} \right)^2} \quad (4.4)$$

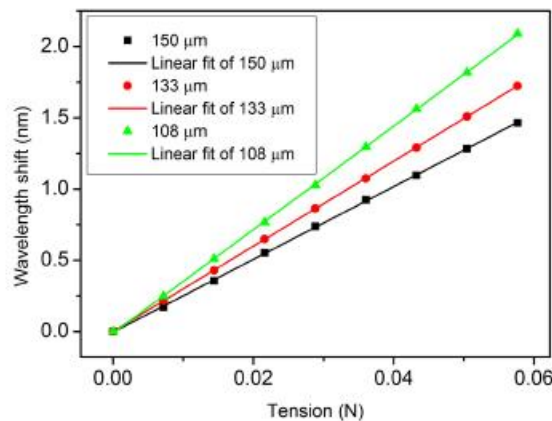
Este tipo de redes que se han explicado se vienen fabricando actualmente en la ventana de telecomunicaciones de 1260-1650nm, donde las PMMA tienen una atenuación considerablemente elevada, esto las hace incompatibles con los demoduladores FBG comerciales del mercado actual, los cuales operan en la banda citada. Además, trabajar en el rango de longitud de onda visible implica

períodos de cambios de índice de difracción muy pequeños, por lo que es difícil construir máscaras de fase en esta parte del espectro. Sin embargo, las fibras de plástico tienen también algunas características como son la sensibilidad a la temperatura y tensión que hacen interesante su uso para la fabricación de FBGs en este tipo de fibras con aplicaciones de sintonización de la red a determinadas longitudes de onda.

En la Figura 4.12 se puede observar como se ha obtenido, mediante un incremento de la temperatura de unos 20°C, una diferencia de longitud de onda de unos 1.5nm con respecto a la longitud de onda central inicial. Este fenómeno se produce debido a que el calor modifica el patrón de cambios de índice de refracción de la FBG que a su vez va directamente relacionado con la longitud de onda reflejada. En la Figura 4.13 se puede observar también los resultados obtenidos mediante la aplicación de una tensión axial y su modificación en la longitud de onda [26].



**Figura 4.12: Cambios de longitud de onda con respecto a la temperatura de FBG**



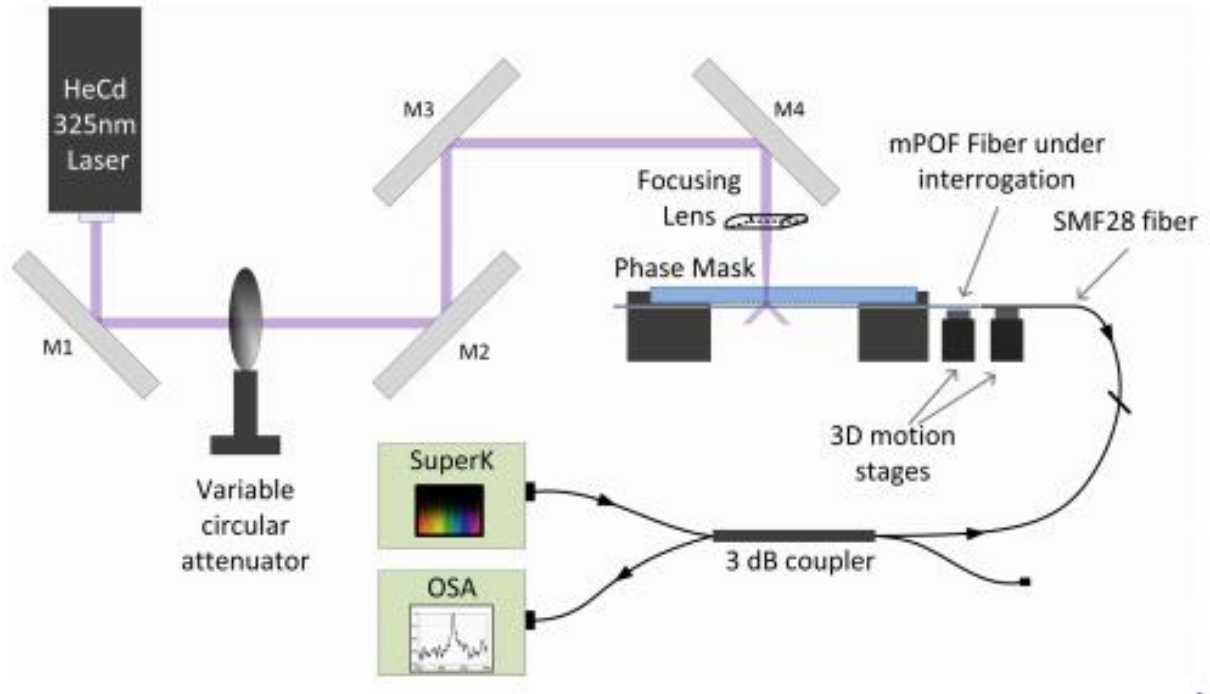
**Figura 4.13: Cambios de longitud de onda con respecto a la tensión de FBG**

La inclusión de las redes de difracción de Bragg en polímeros se ha venido estudiando mediante diferentes métodos como la inscripción directa punto a punto usando un láser de femtosegundos de zafiro, la combinación de máscaras de fase y anillo interferométrico o la más común que es la técnica de máscara de fase.

Una línea de investigación de la Universidad de Dinamarca ha realizado un estudio el cual se basa en la inscripción de una FBG en una fibra mPOF mediante la técnica de máscara de fase. Las fibras mPOF, microstructured polymer optical fibre, se tratan de fibras en las que la guía de luz se da por una serie de agujeros que actúan como una cubierta que recubre el núcleo sólido. Cuando los agujeros contienen aire, el índice de refracción medio de la cubierta baja en comparación con el núcleo sólido de polímero, dando unas condiciones de total reflexión interna y propiciando una guía de luz. Estas fibras permiten no tener que añadir polímeros al núcleo de la fibra para incrementar el índice de refracción.

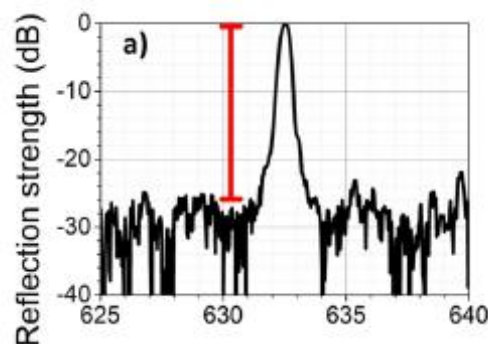


El elemento utilizado para la realización de la FBG es un láser HeCd de onda continua de 30mW operando a 325nm, el cual tiene un haz circular Gaussiano de un diámetro aproximado de 3mm que se dirige directamente a través de 4 espejos hasta llegar a una lente de focalización. La lente se trata de una lente cilíndrica convexa con una longitud focal de 25mm y que focaliza el haz a través de la máscara de fase hacia la fibra de debajo de la máscara que está tendida a 100  $\mu\text{m}$  por debajo de la máscara realizando un cambio periódico en el índice de refracción del núcleo de la fibra [27].



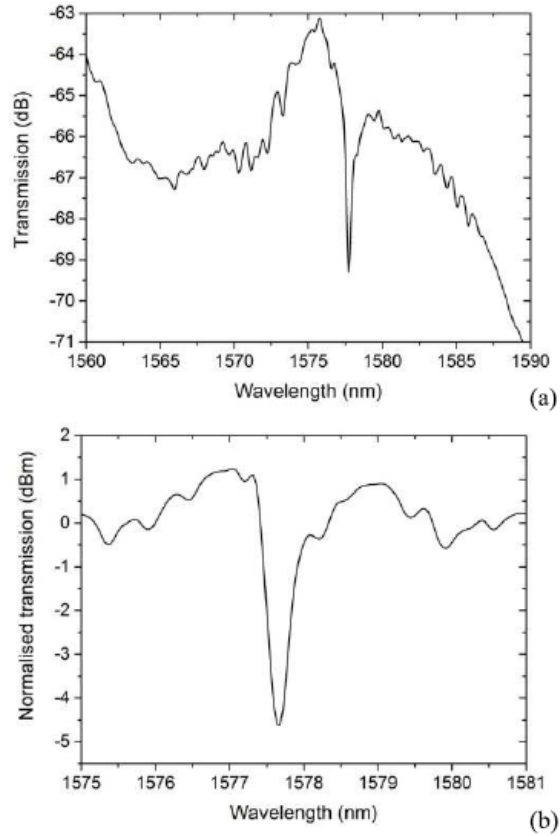
*Figura 4.14: Esquema de inscripción de una FBG*

El estudio ofrece unos resultados esperanzadores donde se consigue una reflexión de prácticamente el 100% para una longitud de onda de 632.5nm y un ancho de 0.3nm aproximadamente [27].



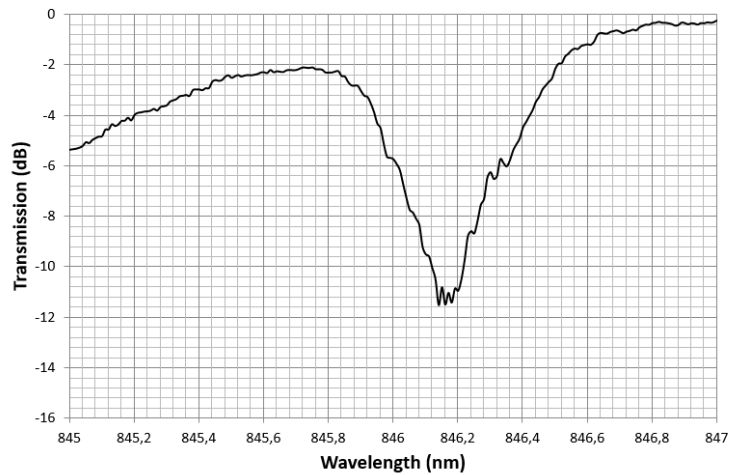
*Figura 4.15: Espectro FBG en estudio*

Otra aplicación interesante y en investigación por primera vez en 2015 son las FBGs inscritas en fibras CYTOP de polímero de bajas pérdidas mediante un láser de femtosegundos y que permiten trabajar en el rango de 1550nm con una reflectividad típica de 70%. Es interesante tener en cuenta este tipo de FBGs ya que por el rango en el que se trabaja podría ser compatible con los dispositivos ya comercializados de WDM para fibras de sílice y que trabaja alrededor de los infrarrojos. Además en el estudio se puede observar el espectro cuantificable del experimento, como se observa en la Figura 4.16 [28]:



**Figura 4.16: Espectro en una FBG en CYTOP POF**

Un ejemplo de FBG en POF en rangos espectrales cercanos a las longitudes de onda visible, se puede observar en la Figura 17, donde se puede ver una FBG fabricada en los laboratorios de la UPV y que corrobora que el principal problema es que se trata de redes muy estrechas que conllevaría penalizaciones en potencia con respecto a las fuentes ópticas laser, por ejemplo, que tienen una anchura de alrededor de 2nm. Este hecho se podrá solventar con las FBG con chirp que están actualmente en investigación y que permitirán redes FBG más anchas.



**Figura 4.17: Espectro de FBG alrededor de 846nm fabricada por laboratorio UPV**

#### 4.6.6. Fibra óptica

El tipo de fibra óptica será la misma que para el primer diseño del trabajo, el modelo ESKA GHCP4001 [12] con un precio de 0,7 € el metro en [www.i-fiberoptics.com](http://www.i-fiberoptics.com).

Fibra Mitsubishi ESKA GHCP4001

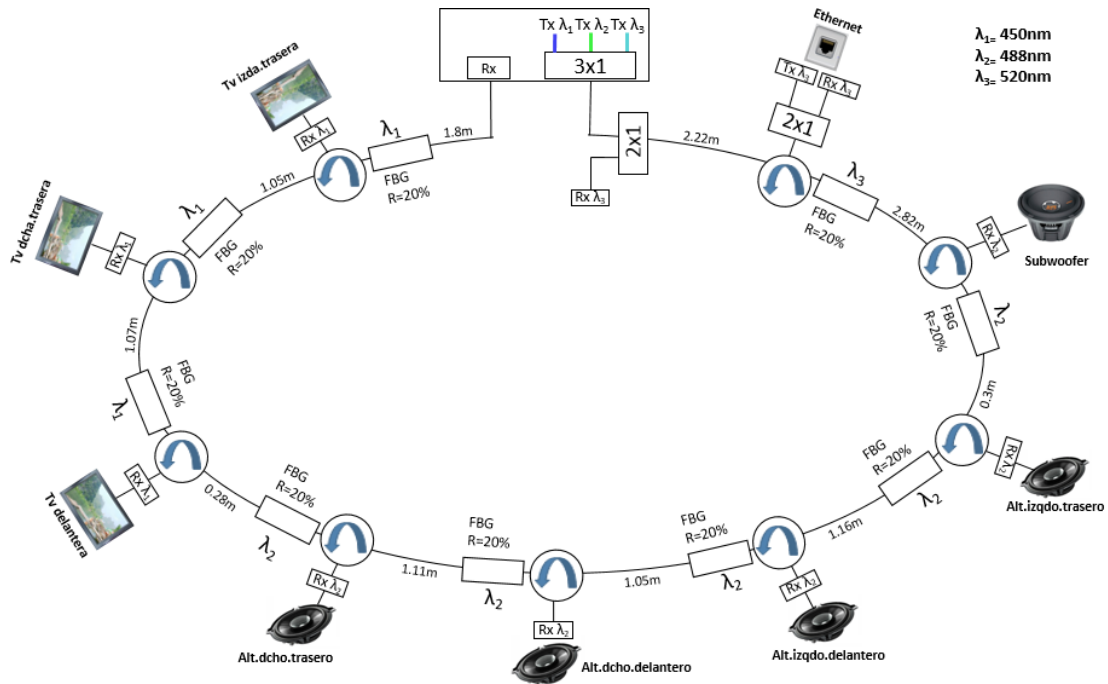
Tipo	SI-PMMA (Step Index PMMA) multimodo
NA	0.5
Índice de refracción del núcleo	1.49
Atenuación máxima	0.19 dB/m
$\Delta f$ máximo	441 MHz
Diámetro de núcleo	0.98 mm
Diámetro cubierta	1 mm
Diámetro sobrecubierta	2.2 mm
Material núcleo	PMMA
Material cubierta	Polímero fluorado
Material sobrecubierta	Polietileno clorado

*Tabla 4.2: Características de la fibra GHCP4001*

### 4.7. Descripción y evaluación del diseño

#### 4.7.1. Topología

Como se ha comentado anteriormente, después de evaluar diferentes posibilidades que conllevan la utilización de multiplexores, demultiplexores, filtros o acopladores se ha optado por el diseño de la Figura 4.18. El uso de la demultiplexación mediante el sistema de circulador más FBG, abre un poco más el abanico de posibilidades en el desarrollo de demultiplexores para sistemas que utilicen fibras PMMA y extiende el uso de las FBGs a sistemas automovilísticos donde no se han expuesto modelos WDM hasta la fecha.



**Figura 4.18: Diseño de red óptica WDM para vehículo**

Para explicar el diseño iremos por partes, comenzando por el canal Ethernet. Dada la bidireccionalidad de este tipo de servicios que requieren tanto de recepción de datos como de subida de datos, se ha incorporado un acoplador 2x1 que duplexará la señal de subida y la señal de bajada, por tanto también serán necesarios un transmisor y un receptor a 530nm en la unidad Ethernet. El fin de que la señal pueda subir a la unidad central a través del circulator es evitar pasar por todos los circulatores, reduciéndose la potencia sustancialmente.

Por lo que respecta al resto de dispositivos, como se ha comentado anteriormente, se realizará una demultiplexación en cada unidad aprovechando la topología del circulator y el uso de las FBG que permiten reflejar el 20% de la señal para las diferentes longitudes de onda que es pasada por el siguiente puerto del circulator y llega al fotodiodo, dejando pasar el 80% restante para que llegue al siguiente dispositivo asociado a esa longitud de onda.

Además, como se puede observar, se han agrupado los dispositivos según la función que desempeñan (audio, vídeo o Ethernet) con la finalidad de asignar el láser con mayor potencia a los últimos dispositivos del sistema, donde las pérdidas acumuladas son más significativas.

Con esta topología evitamos el paso de la señal por todas las unidades de control de los dispositivos, mejorando en retardos y consumo, además de dotar al sistema de una capacidad mayor. Además con la tecnología WDM abrimos la posibilidad de utilizar este tipo de sistema a otras funcionalidades del coche, cuyo principal inconveniente era la capacidad de los tradicionales sistemas de comunicaciones ópticas sobre fibra de plástico y la posible utilización de dispositivos que requieran de tasas mayores.

#### 4.7.2. Balance de potencia y prestaciones

Como ya se ha comentado anteriormente, el principal inconveniente que presenta este tipo de sistema es, a priori, la utilización de acopladores y de numerosos circulatores, los cuales introducen unas pérdidas significativas. Por esta razón se ha realizado un balance de potencias, con la potencia que llega a cada dispositivo del sistema con el fin de garantizar que llega una potencia mínima para la correcta detención en el fotodiodo pin.

En la tabla 4.3 se puede observar un extracto del balance de potencia del sistema WDM donde se ve la potencia recibida en cada dispositivo.

Dispositivo	Potencia recibida (dBm)	Sensibilidad del receptor (dBm)
Ethernet1	-7,9	-20
Subwoofer	-5,9	-22,7
Altavoz izdo. trasero	-9,34	-22,7
Altavoz izdo. delantero	-12,83	-22,7
Altavoz dcho. delantero	-16,3	-22,7
Altavoz dcho. trasero	-19,78	-22,7
Pantalla delantera	-15,34	-22,5
Pantalla dcha. trasera	-18,80	-22,5
Pantalla izda. trasera	-22,27	-22,5

*Tabla 4.3: Balance de potencias*

Como se puede observar en la tabla 4.3, el sistema cumple el balance de potencia holgadamente en todos los casos excepto en la pantalla izquierda trasera donde la potencia recibida se acerca mucho a la sensibilidad máxima del receptor, lo que garantizaría el funcionamiento del dispositivo, sin embargo ante la más mínima variación de potencia debido a la temperatura o el desgaste del sistema, podría producir fallos.

Por lo que respecta a las prestaciones del sistema, con el nuevo diseño WDM se evita tener que pasar por todos los receptores para realizar una transmisión única de datos, por tanto el balance de tiempos nos permitirá una limitación menos estricta del ancho de banda del sistema, siendo utilizados láseres con una frecuencia de modulación de más de 100 MHz y probados en sistemas de hasta 1 Gbit/s. Por tanto, ateniéndonos a la peor situación estipulada en el catálogo de los láseres, de un ancho de 100 MHz y utilizando la modulación 3-PAM del primer diseño, obtenemos la siguiente tasa de transmisión máxima para cada uno de los diferentes servicios:

$$R = \Delta f \times Eficiencia = 100 \text{ MHz} \times 1.585 \frac{\text{bit}}{\text{Hz}} = \mathbf{158.5 \text{ Mbps}} \quad (4.5)$$

Servicio	Tasa (Mbps)
Audio	158,5
Vídeo	158,5
Ethernet	158,5

*Tabla 4.4: Tasa máxima para los servicios*

### 4.7.3. Presupuesto

Al igual que para el primer diseño del trabajo, se realizará un presupuesto acorde con los componentes ópticos utilizados y su precio en el mercado actual con el fin de realizar una comparativa entre los dos sistemas expuestos en el trabajo.

En la tabla 4.5 se puede ver un extracto del presupuesto realizado y donde se indica el precio de cada componente y el coste total del diseño WDM.

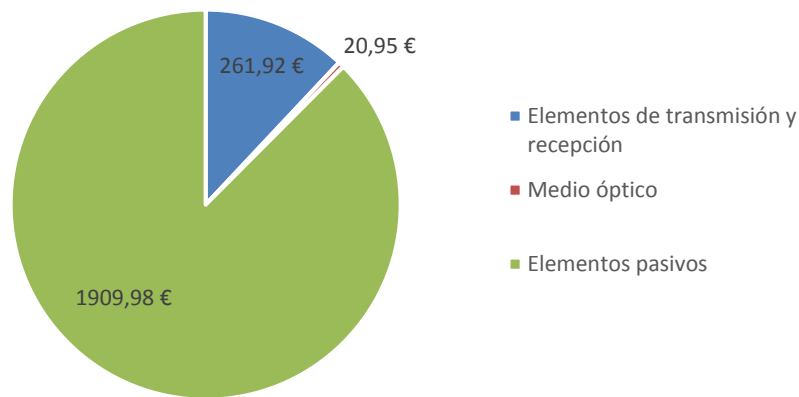
<b>Componente</b>	<b>Cantidad/longitud (m)*</b>	<b>Precio por componente (€)/precio por metro (€)*</b>	<b>Precio por tipo de componente (€)</b>
Láser SRAM PL-450B[17]	1	38,33	38,33
Láser OSRAM PLT5-488[18]	1	39	39
Láser OSRAM PL-520[19]	2	48,47	96,94
Fotodiodo MTD5052W[20]	2	6,88	13,76
Fotodiodo S7797[21]	9	8,21	73,89
Circulador ascentta[22]	9	90	810
Acopladores[23]	3	66,66	199,98
FBG**	9	100	900
Fibra ESKA GHCP4001[12]*	12,86	0,7	9
Adaptador USB-RJ45	1	11,95	11,95

<b>Coste total del sistema (€)</b>	<b>2192,85</b>
------------------------------------	----------------

*Tabla 4.5: Presupuesto diseño WDM*

*\*\* Coste de FBG aproximado*

Como se puede observar en la tabla 4.5, el presupuesto del sistema propuesto WDM se eleva hasta los 2192,85 €, una cantidad razonablemente más alta que el que se obtenía para el sistema monocanal propuesto. Este hecho se da principalmente por el sistema de multiplexado y demultiplexado, inexistente en el diseño monocanal y que encarece el coste del sistema. Actualmente no existen muchas posibilidades de multiplexado y demultiplexado para sistema POF, por lo que los elementos que se utilizan escasean en el mercado. En el gráfico 4.1 se desglosa el presupuesto del sistema WDM y se puede observar como prácticamente la mayor parte del coste corresponde a los elementos pasivos como acopladores, circuladores y FBGs y que se requieren en el sistema para multiplexar y demultiplexar la señal.



*Gráfico 4.1: Reparto de presupuesto en sistema WDM*

#### 4.7.4. Consumo de potencia

Uno de los aspectos a mejorar en el primer diseño del trabajo se trataba del consumo de potencia, muy elevado y que aspiraba a mejorar con la nueva topología del sistema WDM. Con el fin de realizar la comparativa en términos de consumo, se puede observar en la tabla 4.6 las nuevas características en términos de consumo del sistema WDM.

Para establecer un marco comparativo, se realizará el cálculo del consumo de potencia, en primer lugar, para transmisiones simples de vídeo, audio o Ethernet para, a continuación, realizar el estudio para el sistema trabajando en máximas prestaciones, enviando vídeo, audio y Ethernet a la vez.

##### Vídeo

Componente	Cantidad	Consumo por unidad (W)	Consumo por tipo de componente (W)
Láser 450 nm	1	0,58	0,58
Fotodiodo S7797	4	0,05	0,2

<b>Consumo total vídeo (W)</b>	<b>0,78</b>
--------------------------------	-------------

##### Audio

Componente	Cantidad	Consumo por unidad (W)	Consumo por tipo de componente (W)
Láser 488 nm	1	0,51	0,51
Fotodiodo S7797	6	0,05	0,3

<b>Consumo total vídeo (W)</b>	0,81
--------------------------------	------

#### Ethernet

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Consumo por unidad (W)</b>	<b>Consumo por tipo de componente (W)</b>
Láser 520 nm	2	1,05	2,05
Fotodiodo MTD5052	2	0,03	0,06
Fotodiodo S7797	1	0,05	0,05

<b>Consumo total vídeo (W)</b>	2,16
--------------------------------	------

*Tabla 4.6: Consumo de las transmisiones únicas de vídeo, audio y Ethernet*

Por lo que respecta al consumo del sistema trabajando en máximas prestaciones (transmitiendo todas las señales a la vez) el consumo del sistema se calcula sumando el consumo individual de cada uno de los sistemas de vídeo, audio y Ethernet.

<b>Consumo en máximas prestaciones (W)</b>	3,65
--	------

*Tabla 4.7: Consumo del sistema en máximas prestaciones*

## 4.8. Comparativa de diseños

Tras realizar el análisis en términos de prestaciones, costes y consumo de los sistemas diseñados en este trabajo realizaremos una comparativa entre ambos con el fin de analizar las ventajas y desventajas de ambos diseños.

En lo que a coste refiere, se observa que el sistema basado en la topología MOST (diseño monocal), se trata de un sistema muy económico que permite su amplia implementación en el mercado. Este ahorro en coste viene de la utilización de transceptores comúnmente comercializados y de una topología que evita la utilización de acopladores u otros sistemas ópticos que incrementen el coste. Por lo que respecta al sistema WDM, tiene un coste mucho más elevado que deriva de la utilización de acopladores, FBGs y circuladores, que aparte de ser elementos costosos, están aún en desarrollo para la tecnología POF, lo que hace que haya pocos modelos en el mercado, incrementando su coste. Además, el hecho de que se utilice tecnología láser hace que se incremente el presupuesto, ya que los láseres utilizados en el sistema óptico WDM son más caros que los transceptores estandarizados en el primer sistema.

En el tema de prestaciones, ya se ha comentado que el diseño monocal cubre bastante bien los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del diseño, reservando unas tasas de transmisión acordes a lo necesario para ofrecer unos servicios de vídeo, audio y Ethernet mínimos en el automóvil, limitándose en gran parte el ancho de banda del sistema en el caso de la inclusión de un mayor número de dispositivos o de dispositivos que requieran una tasa de datos mayor. Por el contrario, el sistema WDM ofrece unas prestaciones muy altas, prácticamente triplicando el ancho de banda del sistema mediante el uso de diferentes longitudes de onda y la utilización de láseres potentes que han sido probados en diferentes estudios para transmisiones de más de un Gigabit con modulaciones más complejas y una correcta ecualización. Este sistema WDM permitiría la utilización de dispositivos más potentes o formatos con mayor calidad en el automóvil, lo que sería muy interesante en el futuro para



realizar transmisiones de vídeo bluray o de formatos futuros de más calidad o la opción de recibir señal de datos para conectividad a internet con mayor tasa de bajada y subida, concepto muy importante a corto plazo con las actuales investigaciones en 5G y el internet de las cosas que pretende que todo este intercomunicado. Estas son unas grandes ventajas pero el sistema propuesto tiene también limitaciones y es que mientras que la principal limitación del sistema monocal es el ancho de banda, en este caso en WDM no lo será, pero el sistema está limitado por su balance de potencia el cual impide la inclusión de un gran número de dispositivos con la topología expuesta, lo cual podría solucionarse con otras topologías como en árbol.

Además, y aunque está directamente relacionado con el ancho de banda del sistema y las prestaciones, una diferencia significativa entre ambos sistemas es el retardo en las transmisión. Para el sistema MOST existe un gran retardo producido por el paso de la señal por todos los transceptores del anillo, aunque se trate de una transmisión simple de audio, por ejemplo, mientras que en el sistema WDM no existe prácticamente retardo al no tener que realizar un paso por todas las unidades de control y simplemente llega la señal al receptor correspondiente a la señal de datos.

Por último, hablaremos del tema del consumo de los equipos en los dos diseños. Como se ha comentado anteriormente, el sistema monocal tenía un consumo para una transmisión única de 2,37 W mientras que utilizando la topología WDM el consumo sería muy similar, 2,14 W en el caso de una transmisión de señal Ethernet, reduciéndose hasta aproximadamente 0,8 W en el caso de señal de audio o vídeo. Por tanto, y aunque no es significativo, se podrá evitar parte del exceso de consumo producido en el primer diseño por su topología. Sin embargo, con el sistema trabajando a máximas prestaciones, o lo que es igual, emitiendo todas las señales a la vez, el primer diseño supone la misma potencia radiada mientras que en el diseño WDM se eleva el consumo de potencia hasta los 3,65 W.

En la tabla 4.8 se muestra una tabla con algunos aspectos que caracterizan los sistemas, con el fin de realizar una comparación, y donde se ha marcado con un tic el sistema que mejores prestaciones da en cada aspecto:

<b>Características</b>	<b>Diseño sistema monocal</b>	<b>Diseño WDM</b>
Coste	✓	
Implementación	✓	
Prestaciones		✓
Consumo transmisión única		✓
Consumo máximas prestaciones	✓	
Retardo		✓

*Tabla 4.8: Características de los diseños*

## Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo de este trabajo consistía en realizar un sistema novedoso en lo que a redes de fibra óptica de plástico en automóviles se refiere, añadiendo la tecnología WDM aún muy poco utilizada en las POF, con el fin de obtener un sistema mucho más potente que permita adaptarse a las continuas evoluciones tecnológicas que se producen y que llevarán a dotar a los automóviles de unos sistemas muy sofisticados que requerirán de unas prestaciones muy elevadas con unos retardos ínfimos.

Con la finalidad de llegar al objetivo final, se ha realizado un análisis de las ventajas en la utilización de fibra óptica de plástico en el ámbito de la automovilística, para posteriormente sondear el estado del arte actual de las fibras POF en automóviles. Además se ha realizado un diseño partiendo del estándar más implementado en la actualidad como es el MOST150 para posteriormente realizar modificaciones en el diseño y añadir la tecnología WDM con el fin de conseguir un diseño con mayores prestaciones.

Tras explicar las ventajas de la fibra óptica de plástico como medios transmisores, ha quedado claro que son numerosos los beneficios que conlleva su implantación en los sistemas de comunicaciones de datos: se trata de fibras muy flexibles y de diámetro grande que les permite buenas propiedades de flexión y torsión, además, el gran tamaño del diámetro del núcleo permite una tolerancia mecánica holgada y permite que sean muy resistentes a la contaminación, siendo también fibras fáciles de procesar y de un precio muy económico. Además, por la ventana en la que trabaja (espectro visible), su atenuación es alrededor de 0,14 dB/m a 650nm lo que conlleva a ser propicia de ser utilizada en sistemas de comunicaciones de datos de corta distancia, habiendo transmisores y receptores económicos para ese rango de longitudes de onda en el mercado.

Tal y como se ha comentado que actualmente el sistema más implementado para comunicaciones de datos en fibra óptica de plástico en automóviles es el sistema MOST150, que se trata de un sistema para aplicaciones de entretenimiento en el automóvil, dotando de una infraestructura y protocolos ópticos necesarios para la transmisión de audio, vídeo e internet en el coche mediante un sistema sencillo de implementar y económico.

Una vez que se han analizado los componentes necesarios para un sistema típico como el MOST, se ha procedido al diseño de una red propia para proporcionar canales de audio, vídeo y Ethernet en un automóvil, tomando como modelo el sistema MOST150, donde se ha concluido que se trata de un sistema que cumple con los requisitos de este tipo de aplicaciones en el coche con un coste de 377 € pero que se ve limitado a la hora de ampliar el sistema o de utilizar dispositivos más potentes que necesiten mayor ancho de banda, ya que la tasa máxima del sistema diseñado es de aproximadamente 100 Mbps. Además después de realizar un estudio del consumo, se ha concluido que se está realizando un derroche de potencia por el tipo de topología que se utiliza en la cual se requiere del paso por todas las unidades de control y con la consiguiente utilización de los componentes en ella, como son los transceptores ópticos, que eleva el consumo hasta los 2,37 W.

Con el fin de mejorar el primer diseño realizado, se ha hecho una modificación sustancial de la topología del sistema y se ha añadido la tecnología WDM. La utilización de WDM ha conllevado a realizar un estudio de la multiplexación y demultiplexación en el sistema, eligiendo un multiplexado típico mediante un acoplador 3x1 y una demultiplexación más novedosa mediante un sistema de circuladores y redes de Bragg. El uso de estos dispositivos junto con la utilización de los láseres y receptores y los elementos extras que ha sido necesario añadir para el duplexado Ethernet (en el diseño monocanal se subsanaba con la propia topología del sistema) ha elevado el coste del sistema WDM hasta los 2192 €. A cambio, se ha conseguido un sistema mucho más potente que el primer diseño, consiguiendo triplicar la tasa de transmisión hasta los 475 Mbps mediante el uso de 3 longitudes de onda distintas. El coste aproximado del sistema WDM es prácticamente 7 veces el coste del sistema monocanal por lo que esta propuesta iría orientada a la implementación automovilística de gama alta en la que el precio proporcional del coche fuera mucho más elevado y los dispositivos fueran de gran calidad y requieran unos anchos de banda elevados. Además este sistema puede aplicarse a otros sectores del automóvil como puede ser la seguridad o la conducción, pudiéndose presentar como una solución a los sistemas de conducción

autónoma o ayudas a la conducción con la inclusión de cámaras de vídeo las cuales requieren de un ancho de banda muy elevado ya que necesitan de una transmisión streaming desde la cámara a los monitores correspondientes.

En los casos en el que el automóvil sea de gama media-baja y la tecnología de entretenimiento in-car sea de calidad estándar o no disponga el automóvil de sistemas sofisticados de ayuda a la conducción, el sistema monocanal será mucho más interesante en términos de presupuesto.

En lo que a consumo se refiere, se ha logrado reducir ligeramente la potencia disipada para transmisiones simples de audio (0,81 W), vídeo (0,78 W) o Ethernet (2,16 W), mientras que para el uso del sistema en máximas prestaciones el consumo se eleva hasta los 3,65 W.

<b>Características</b>	<b>Diseño sistema MOST</b>	<b>Diseño WDM</b>
Prestaciones	100 Mbps	475 Mbps
Coste	377 €	2192 €
Consumo transmisión simple	2,37 W	0,78 W a 2,16 W
Consumo máximas prestaciones	2,37 W	3,65 W

*Tabla 5.1: Resumen de características de los sistemas*

Como conclusión, destacar la evolución que están teniendo en los últimos tiempos los sistemas de fibra óptica de plástico en el ámbito de las comunicaciones de datos a corta distancia donde cada vez más se están imponiendo a los medios de transmisión convencionales, extendiéndose incluso a las redes de comunicaciones de datos en el hogar y a comunicaciones de media distancia donde se están realizando numerosas investigaciones con resultados muy prometedores. Un ejemplo son las CYTOP POF son fibras POF que trabajan en alrededor de 1550nm y con unas pérdidas muy bajas que se presentan como firmes candidatas a ser el medio óptico para comunicaciones de larga distancia en fibra óptica.

Además, en lo que a los sistemas para automóviles se refiere, no es una tecnología estancada y en los próximos años se logrará una evolución importante dotando a los coches de sistemas de más de 1 Gigabit/s y extendiéndose al resto de utilidades del vehículo, dotándolo de una comunicación completa que vendrá acompañada de sistemas de seguridad y conducción autónoma con gestión de las transmisiones de datos de manera óptica.

En lo que se refiere a las líneas futuras, la tecnología WDM-POF aún está en sus inicios y son numerosas las líneas de futuro que puede presentar. En primer lugar, actualmente, son las fibras PMMA las más utilizadas en los sistemas POF y WDM-POF por las características ya expuestas en el trabajo, pero las fibras PCS serán el medio de transmisión a corto plazo por sus menores pérdidas y mayor ancho de banda que las PMMA, aunque actualmente no suelen ser implementadas por su núcleo pequeño que complica la instalación, además del elevado precio en comparación con las tradicionales PMMA.

Centrándonos en WDM-POF, son numerosas las investigaciones en curso que se dedican a realizar pruebas para la realización de sistemas WDM-POF con tasas de transmisión muy elevadas y que hacen muy probable que en un período no muy largo se implemente esta tecnología como sistema de fibra para los hogares.

Otro aspecto en continua evolución es el desarrollo de elementos necesarios en los diferentes sistemas WDM como puede ser acopladores, circuladores, filtros o FBGs, los cuales están ya comúnmente comercializados en infrarrojos pero aún no se han desarrollado plenamente en el rango visible donde trabajan las POF. Por tanto en el futuro contaremos con elementos de estas características con menores pérdidas que favorecerán el uso de estos en sistemas que requieran de mayores pérdidas o de un gran número de dispositivos.

Como ya se ha comentado a lo largo del trabajo, en el caso concreto de las FBG en POF, se comenzaron a investigar bastante tarde en relación con los dispositivos para sílice y el mecanismo costoso de

fabricación han hecho que no estén plenamente desarrolladas actualmente, aunque ya se están fabricando con éxito en algunos experimentos sin ser comercializadas como tal. El hecho de conseguir este tipo de dispositivos en el rango visible es muy importante ya que, además de poder ser utilizado como ha sido el caso de este trabajo, como demultiplexor, no es su único uso. Estas redes son muy usadas como sensores de deformación, por ejemplo, si la fibra se estira o se comprime, la deformación realiza un cambio en el período de la microestructura y, por tanto, en la longitud de onda de la red de difracción. Además también se usa como sensor de temperatura al variar el índice de refracción del silicio por el efecto termoóptico.

En cuanto a las próximas líneas de desarrollo para FBGs en POF se orientan a FBGs con chirp que permitirían utilizar fuentes de transmisión más anchas, como sería el caso de este trabajo, y evitando las pérdidas de transmisión que existen hasta ahora en los dispositivos bajo desarrollo. Otra opción a considerar sería, en el futuro, mejorar las tecnologías utilizadas para fabricar FBGs en fibras de plímero multimodo.

Por último, comentar la importancia del desarrollo de todos estos sistemas de fibra óptica en automóviles en la actualidad con el fin de llegar, en un futuro no muy lejano, a tener una total conexión de todo lo que nos rodea dentro del automóvil, con sistemas económicos y potentes que permitan tener una total conectividad y un sinfín de comodidades con tal de tener un entorno cómodo y seguro dentro de los automóviles.

## Referencias

- [1] Thomas Kibler, Stefan Poferl, Gotthard Böck, Hans-Peter Huber y Eberhard Zeeb. Optical Data Buses for Automotive Applications. *Journal of lightwave technology*, Vol. 22, No. 9, 2004.
- [2] Most forum. The automotive multimedia network. *Most150 Book*, 2011.
- [3] Otto Strobel, Ridha Rejeb y Jan Lubkoll. Communication in Automotive Systems: Principles, Limits and New Trends for Vehicles, Airplanes and Vessels. *INCTON*, 2010.
- [4] R. Kruglov, J. Vinogradov, S. Loquai, O. Ziemann, C.-A. Bunge, T. Hager, U. Strauss. 21.4 Gb/s Discrete Multitone Transmission over 50-m SI-POF employing 6-channel WDM. *OFC*, 2014.
- [5] Elektronik automotive. Special issue MOST, 2011.
- [6] Sebastian Randel, S.C.Jeffrey Lee, Bernhard Spinnler, Florian Breyer, Harald Rohde, Joachim Walewski, A.M.J.Koonen, Andreas Kirstadter. 1 Gbit/s Transmission with 6.3 bit/s/Hz Spectral Efficiency in a 100 m Standar 1 mm Step-Index Plastic Optical Fibre Link Using Adaptive Multiple Sub-Carrier Modulation, 2006.
- [7] Jan Bauer, Marcus Bosinger, Dieter Seidl. MOST150 in the New Mercedes-Benz S-Class. *Elektronik network and system*, 2014.
- [8] Avagotech. AFBR-1150L/AFBR-2150L Fiber Optic Transmitter and Receiver. <http://doc.avagotech.com/docs/AV02-2343EN> , 2015.
- [9] Avagotech. AFBR-5972Z Fiber Optic Transmitter and Receiver. <http://www.farnell.com/datasheets/1500264.pdf> , 2011.
- [10] Avagotech. AFBR-59F3Z Fiber Optic Transmitter and Receiver. [http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-4655EN\\_DS\\_AFBR-59F3Z\\_2016-03-16909754.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-4655EN_DS_AFBR-59F3Z_2016-03-16909754.pdf) ,2015
- [11] Avagotech. AFBR-59F2Z Fiber Optic Transmitter and Receiver. [http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-4756EN\\_DS\\_AFBR-59F2Z\\_2015-11-06-909400.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-4756EN_DS_AFBR-59F2Z_2015-11-06-909400.pdf) ,2015
- [12] Mitsubishi. GHCP4001 optical fiber. [http://fiberopticpof.com/pdfs/Plastic\\_Fiber\\_Optics\\_&\\_Cable/ESKA\\_GH\\_Grade\\_Cable\\_Data\\_PointTOPoint/GHCP\\_4001\\_Product\\_Information.pdf](http://fiberopticpof.com/pdfs/Plastic_Fiber_Optics_&_Cable/ESKA_GH_Grade_Cable_Data_PointTOPoint/GHCP_4001_Product_Information.pdf) , 2010.
- [13] Mitsubishi. BH2001 optical fiber. <http://www.i-fiberoptics.com/pdf/bh2001.pdf> , 2004.
- [14] Mitsubishi. MH4001 optical fiber. [http://fiberopticpof.com/pdfs/Plastic\\_Fiber\\_Optics\\_&\\_Cable/ESKA\\_MH\\_Fiber\\_Optic\\_Cable\\_Data\\_HighBandwidthforNetwork/MH\\_4001\\_Product\\_Information.pdf](http://fiberopticpof.com/pdfs/Plastic_Fiber_Optics_&_Cable/ESKA_MH_Fiber_Optic_Cable_Data_HighBandwidthforNetwork/MH_4001_Product_Information.pdf) , 2010.
- [15] Microchip. Microchip OS81118. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001935A.pdf> , 2015.
- [16] Rankie. Adaptador USB-RJ45. <https://www.amazon.es/Adaptador-Rankie-Velocidad-Ethernet-Convertidor/dp/B010SEARPU>

- [17] M. Joncic, M.Haupt y U.H.P Fischer. Investigation on spectral grids for VIS WDM applications over SI-POF. *ITG-Fachbericht 241: Photonische Netze*, 2013.
- [18] OSRAM. Blue laser Diode in TO38 ICut Bauform.  
<http://www.mouser.com/ds/2/311/PL%20450B-461028.pdf> , 2013.
- [19] OSRAM. Cyan laser Diode in TO56 Package.  
[http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00206440\\_0.pdf/PLT5%20488.pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic6/00206440_0.pdf/PLT5%20488.pdf) , 2015.
- [20] OSRAM. Green laser Diode in TO38 ICut Package.  
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/13dd/0900766b813dd131.pdf> , 2013.
- [21] Marktech optoelectronics. MTD5052W photodiode.  
[http://www.marktechopto.com/pdf/products/datasheet/MTD5052W\\_2011\\_07\\_20.pdf](http://www.marktechopto.com/pdf/products/datasheet/MTD5052W_2011_07_20.pdf) , 2011.
- [22] Hamamatsu. S7797 photodiode.  
<http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/212420/HAMAMATSU/S5052.html> , 2004.
- [23] Ascentta. Single mode 3-port circulator.  
<http://www.ascentta.com> , 2014.
- [24] K.T.Kim y B.J.Han. High-Performance Plastic Optical Fiber Coupler Based on Heating and Pressing. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL.23, No.24, 2011.
- [25] I.P.Johnson. Grating devices in polymer optical fibre. *Aston University*, 2011.
- [26] Xuehao Hu, Chi-Fung Jeff Pun, Hwa-Yaw Tam, Patrice Mégret y Christophe Caucheteur. Highly reflective Bragg gratings in slightly etched step-index polymer optical fiber, 2011.
- [27] Ivan-Lazar Bundalo, Kristian Nielsen, Christos Markos y Ole Bang. Bragg grating writing in PMMA microstructured polymer optical fiber in less than 7 minutes. 2013.
- [28] Amédée Lacraz, Michael Polis, Antreas Theodosiou, Charalambos Koutsides y Kyriacos Kalli. Femtosecond Laser Inscribed Bragg Gratings in Low Loss CYTOP Polymer Fiber, 2015.

# Anexos

## Anexo 1: Transceptor AFBR-59F2Z

### AFBR-59F2Z

250MBd Compact 650nm Transceiver for Data communication over Polymer Optical Fiber (POF) cables with a bare fiber locking system

### Data Sheet



#### Description

The Avago Technologies AFBR-59F2Z transceiver provides system designers with the ability to support serial communication with baud rates of up to 250MBd over 2.2mm jacketed standard polymer optical fiber (POF).

The innovative bare fiber locking mechanism of the transceiver allows connection of POF cable with a simple insert and lock system eliminating the need for connectors. This facilitates fast installation and maintenance.

The AFBR-59F2Z is Laser Class 1, lead-free and compliant with RoHS. The very compact design is similar to that of the well known RJ-45 connector.

#### Transmitter

The transmitter consists of a 650nm LED which is controlled by a fully integrated driver IC. The LED driver operates at 3.3V. It receives Low Voltage Differential Signaling (LVDS) electrical input, and converts it into a modulated current driving the LED. LED and driver IC are packaged in an optical subassembly.

The optimized lens system of the optical subassembly couples the emitted optical power very efficiently into 1mm core POF cable.

#### Receiver

The receiver utilizes a fully integrated single chip solution which provides excellent immunity to EMI and fast transient dV/dt rejection. The receiver directly converts light to a digital LVDS output signal and operates at 3.3V nominal supply. The integrated receiver is packaged in an optical subassembly, which couples optical power efficiently from POF to the receiving PIN.

The receiver features an analog monitor output of the incoming optical signal. The monitor output provides an analog voltage proportional to the average optical input power. In absence of receiver optical input signal, the receiver is in low power sleep mode and the differential output signal is pulled to ground. The receiver wakes up, when a valid optical input signal is detected.

#### Features

- Easy bare fiber termination solution for 2.2mm jacket POF
- EMI/ EMC robust
- Link lengths up to 40m POF
- LVDS interface compatible
- Operating temp. range -40°C to 85°C
- 3.3V power supply operation
- Analog monitor output (MON)
- Low power sleep mode

#### Applications

- Factory automation
- Power generation and distribution system
- Industrial vision system
- Solar panel tracking system
- Home/ Office Networking

#### Package

The transceiver package contains the two optical subassemblies which are mounted in the housing for bare fiber connection.

The metal shield on bare fiber clamp transceiver provides excellent immunity to EMI/ EMC

#### Recommended compliance table

Feature	Test Method	Performance
Electrostatic discharge (ESD) to the electrical Pins	JESD22-A114	Withstands up to 2kV HBM applied between the electrical pins.
Immunity	Variation of IEC 61000-4-3	Typically shows no measurable effect from a 15V/m field swept from 8MHz to 1GHz applied to the transceiver when mounted on a circuit board without chassis enclosure.
Eye safety	EN 60825-1:52007	Laser Class 1 product (LED radiation only). TÜV certificate:R50217706. CAUTION – Use of controls or adjustments of performance or procedures other than those specified herein may result in hazardous radiation exposure.

#### Absolute Maximum Ratings

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause catastrophic damage to the device. Limits apply to each parameter in isolation, all other parameters having values within the recommended operation conditions. It should not be assumed that limiting values of more than one parameter can be applied to the products at the same time. Exposure to the absolute maximum ratings for extended periods can adversely affect device reliability.

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units
Supply Voltage	V <sub>dd Max</sub>	-0.5	4.5	V
Storage Temperature	T <sub>STG</sub>	-40	85	°C
Lead Soldering Temperature [1]	T <sub>sold</sub>		260	°C
Lead Soldering Time [1]	t <sub>sold</sub>		10	s
Electrostatic Voltage Capability [2]	ESD		2.0	kV
Installation Temperature [3]	T <sub>I</sub>	0	50	°C

Notes:

1. The transceiver is Pb-free wave solderable. According to JEDEC J-STD-020D, the moisture sensitivity classification is MSL2a.
2. ESD Capability for all Pins HBM (human body model) according JESD22-A114B
3. Range over which fibers can be connected/ disconnected to/ from the bare fiber clamp.

#### Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Operating temperature	T <sub>A</sub>	-40	25	85	°C
DC Supply Voltage	V <sub>dd</sub>	3.0	3.3	3.6	V
Baud Rate [4]	BR	10		250	MBd

Note:

4. Data rate of 200 Mbps with 8b/10b coding.

All the data in this specification refer to the operating conditions above and over lifetime unless otherwise stated.

#### Mechanical Characteristics

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Temp. [°C]
Fiber/ Cable Retention Force [5]	-	30	-	N	25
	10	-	50	N	-40...85 [6]
Clamp opening force	-	20	-	N	25
	10	-	30	N	0...50 [6]
Clamp closing force	-	13	-	N	25
	5	-	20	N	0...50 [6]

Notes:

5. Measured with Avago's AFBR-HUDxxxZ (2.2mm duplex-fiber, PE-jacket, without connector) with 100mm/min traction speed.
6. Range over which fibers can be connected/ disconnected to/ from the bare fiber clamp.



### Transmitter Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Current Consumption	$I_{dd}$	-	29.0	40.0	mA
External Input Termination Impedance	$Z_{IN}$	-	100		$\Omega$
LVDS Input Voltage Range to Circuit Common	$V_{IN}$	0.8	-	2.2	V
LVDS Differential Input Voltage	$V_{IN-DIFF}$	200	-	1200	mV

### Transmitter Optical Characteristics (with standard POF NA = 0.5)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Central Wavelength [1]	$\lambda_C$	635	650	675	nm
Spectral Bandwidth (RMS)	$\lambda_{BW}$	-	-	17.0	nm
Average Output Power [1, 3]	$P_O$	-8.5	-	-2.0	dBm
Optical Rise Time (20% - 80%) [1]	$t_r$	-	1.2	3.0	ns
Optical Fall Time (80% - 20%) [1]	$t_f$	-	1.2	3.0	ns
Extinction Ratio [1]	$R_E$	10.0	12.0	-	dB
Duty Cycle Distortion [1]	DCD	-	-	1.0	ns
Random Jitter [1, 2]	RJ	-	-	0.7	ns
Data dependent Jitter [1]	DDJ	-	-	0.8	ns

Notes:

1. Measured at the end of 1m plastic optical fiber (POF) with PRBS 2<sup>7</sup>-1 sequence
2. Peak to peak measurement, based on BER =  $2.5 \times 10^{-10}$
3. Minimum average output power specification value includes 1dB degradation margin

### Receiver Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Current Consumption	$I_{dd}$	-	23.0	30.0	mA
LVDS Output Common Mode Voltage	$V_{CM}$	-	1.2	-	V
LVDS Output Differential Voltage Swing [4]	$V_{O-DIFF}$	500	-	800	mV
Output Rise Time (10% - 90%) [4]	$t_r$	-	1.1	3.0	ns
Output Fall Time (90% - 10%) [4]	$t_f$	-	1.1	3.0	ns
Duty Cycle Distortion [4]	DCD	-	-	1.0	ns
Random Jitter [4, 5, 6]	RJ	-	-	1.0	ns
Data Dependent Jitter [4]	DDJ	-	-	0.8	ns
Output Ratio for MON Pin (to use $I_{MON}$ output of the IC)	$I_{MON}$	-	0.5	-	$\mu A/\mu W$
Monitor Output Voltage Range	$V_{MON}$	0	-	$V_{CC}-1.5$	V
Wake up time after sleep state	$T_{WKUP}$			1.0	ms

Notes:

4. Differential output signal is measured with reference transmitter source, 0.5m POF cable, and PRBS 2<sup>7</sup>-1 sequence.
5. Peak to peak measurement, based on BER =  $2.5 \times 10^{-10}$
6. Maximum random jitter at -15dBm optical input power is 0.4ns.

### Receiver Optical Characteristics

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units
Central Wavelength [7]	$\lambda_C$	635	650	675	nm
Minimum Receiver Input Power [7]	$P_{in Min}$	-21.0	-	-	dBm
Maximum Receiver Input Power [7]	$P_{in Max}$	-	-	-2.0	dBm

Note:

7. Average optical power, measured with a PRBS 2<sup>7</sup>-1 sequence, BER =  $2.5 \times 10^{-10}$

## Anexo 2: Fibra óptica ESKA GHCP4001

### ESKA™ Premier Chlorinated PE Jacketed Optical Fiber Cord: **GHCP4001**

Manufactured by Mitsubishi Rayon Co., Ltd.

Marketed and sold by Mitsubishi International PolymerTrade Corporation

January 2010

Structure		
Core Material	Polymethyl Methacrylate Resin (PMMA)	
Cladding Material	Fluorinated Polymer	
Core Refractive Index	1.49	
Refractive Index Profile	Step Index	
Numerical Aperture	0.5	
	Unit	Typical
Core Diameter	μm	980
Cladding Diameter	μm	1,000
Jacket Diameter	mm	2.2
Approximate Weight	g/m	5.8

Packaging	
Spool Length (m)	500
Net weight on spool (kg)	4.0
Spool Weight (kg)	1.2
Carton Size (mm)	365 X 365 X 160
Carton Weight (kg)	4.6
Master Carton	5 spools
Jacket	
Color and Material	Black, Chlorinated Polyethylene
Indication on Jacket	E89328-A/B MITSUBISHI RAYON AWM 5310 80C VW-1
Fire Rating	UL1581 VW1, Style No.5310

Performance		Criteria for Acceptance and/or [Test Conditions]	Unit	Values
Operation Temperature		No deterioration in optical properties [in a dry atmosphere]*	°C	-55 ~ 85
Operating Temperature in a Moist Atmosphere		No deterioration in optical properties [under 95% RH] **	°C	Max.75
Optical Properties	Transmission Loss [650nm Collimated Light]	[25°C 50% RH]	dB/km	Max.170
		[Operation Temperature]	dB/km	Max.190
Mechanical Characteristics	Minimum Bend Radius	Loss increment ≦ 0.5dB [a quarter bend]	mm	Min.25
	Repeated Bending Endurance	Loss increment ≦ 1 dB [in conformity to the JIS C 6861]***	Times	Min.10,000
	Tensile Strength	[Tensile force at 5% elongation, in conformity to the JIS C 6861]	N	Min.70
	Twisting Endurance	Loss Increment ≦ 1 dB [sample length: 1m, Tensile Force: 4.9N]	Times	Min.5
	Impact Endurance	Loss Increment ≦ 1 dB [in Conformity to the JIS C 6861]	N · m	Min.0.4

Notes: Performance tested in conditions under 25°C unless otherwise indicated.  
\* Attenuation increase shall be <10% after 1,000 hours.  
\*\* Attenuation increase shall be <10% after 1,000 hours, except when due to absorbed water.  
\*\*\* Bend Angle +/−90° , Bend Radius 15mm, Tension 500g.

Applications
The GH-Series of single-jacketed cables are typically used as data transfer media.

## Anexo 3: Microcontrolador OS81118

### Summary

Microchip's OS81118 is the latest member of the MOST150 Intelligent Network Interface Controller (INIC) family that can be seamlessly incorporated into today's MOST150 systems.

With its USB 2.0 high-speed device port, the OS81118 provides all of the capabilities to create a system for in-car mobile and Wi-Fi® connectivity applications on the MOST150 network. Furthermore, the OS81118 enables an easy implementation of the most up-to-date multi-core SoCs to the MOST® network.

In addition to the optical physical layer (oPHY) interface, the OS81118 provides a coax physical layer (cPhy). With its integrated coaxial transceiver, the OS81118 enables a lower cost MOST network physical layer; therefore the OS81118 is not only suited for cost-efficient infotainment solutions but also for Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) networking.

### Features

- 150 Mbps/s MOST network bandwidth
- Intelligent Network Interface Controller architecture that provides a complete network interface on a single chip
- Supports low-cost LED/POF-based optical physical layer and coax physical layer
  - LVDS interfaces for FOTs
  - Integrated coaxial transceiver\* supports dual-simplex as well as full-duplex communication
- Supports state-of-the-art industry standard streaming and packet formats
  - Synchronous audio streams (PCM)
  - Isochronous audio/video streams such as (MPEG, H-264)
  - Ethernet packets for TCP/IP-based applications
  - On-chip IEEE MAC controller
  - MOST high packets for lean file transfer to small microcontrollers with small memory
  - Clock distribution over the network
- Flexible management of available bandwidth
- Embedded MOST network management
  - Network protection mode
  - Hardware and application watchdog timer
  - Intelligent muting

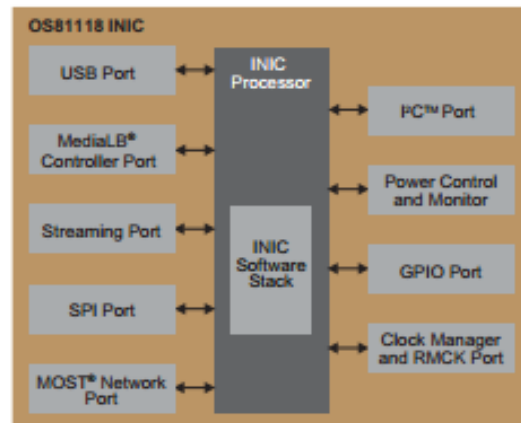


Figure 1: OS81118 Block Diagram

- Supports Inter-Processor Communication (IPC) between the MediaLB® controller and USB
- Provides remote control mode capability
- MOST Technology Linux® Driver available
- Universal Serial Bus (USB) Port supports high-speed USB 2.0 upstream data transfers using either
  - USB 2.0 physical layer
  - High-Speed Inter-Chip (HSIC) physical layer
- Powerful MediaLB controller
  - High-speed differential mode
  - Legacy single-ended mode
- Two configurable streaming ports
  - Two serial data pins per port
  - Capable of routing streaming data in industry standard formats
  - Sequential mode with max. 512xFs on each of the four streaming port pins available
- Operating voltages: 1.2 V\*\* / 1.8 V/3.3 V
- 72-pin QFN (10 × 10 mm)
  - Lead-free, RoHS-compliant package
  - Wettable flanks
- Temperature range (junction): -40°C to +125°C

\*Not available on all product variants.

\*\*Required only when the HSIC interface is used.



## Anexo 4: Láser PL-450B

### PL 450B - PRELIMINARY

Typ Type	Opt. Ausgangsleistung <sup>1)</sup> Optical Output Power <sup>1)</sup> $P_{op}$ (mW)	Bestellnummer Ordering Code
PL 450B	80	Q65111A0518

#### Grenzwerte

Betrieb außerhalb dieser Bedingungen kann das Bauteil schädigen

#### Maximum Ratings

Operation outside these conditions may damage the device

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values		Einheit Unit
		min.	max.	
Max. Opt. Ausgangsleistung <sup>1) 2) 3)</sup> Max. Optical Output Power <sup>1) 2) 3)</sup>	$P_{opmax}$	–	120	mW
Betriebsstrom Operating Current	$I_F$	–	165	mA
Betriebstemperatur Operating Temperature	$T_{Case}$	- 40	+ 70	°C
Lagertemperatur Storage Temperature	$T_{stg}$	- 40	+ 85	°C
Sperrspannung Reverse Voltage	$V_R$	–	2	V
Löttemperatur max. 10 sec. Soldering Temperature max. 10 sec.	$T_{solder}$	–	260	°C

<sup>1)</sup> Optische Leistungsmessungen beziehen sich auf eine Messung mittels Ulbrichtkugel.  
Optical power measurements refer to an integrating sphere.

<sup>2)</sup> Maximal erlaubte optische Ausgangsleistung bei allen Betriebsbedingungen.  
Maximum allowed optical output power at all allowed operating conditions.

<sup>3)</sup> Der Betrieb bei den Grenzwerten beeinflusst die Lebensdauer.  
Operation at maximum ratings may influence the life time.

**Laserkennwerte** ( $T_{case} = 25\text{ °C}$ )  
**Laser Characteristics**

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values			Einheit Unit
		min.	typ.	max.	
Zentrale Emissionswellenlänge <sup>3)</sup> Emission Wavelength <sup>3)</sup>	$\lambda_{peak}$	440	450	460	nm
Spektrale Breite (Halbwertsbreite) <sup>3)</sup> Spectral Width (FWHM) <sup>3)</sup>	$\Delta\lambda$	–	2	–	nm
Schwellstrom Threshold Current	$I_{th}$	–	30	60	mA
Betriebsstrom <sup>3)</sup> Operating Current <sup>3)</sup>	$I_F$	–	100	145	mA
Betriebsspannung <sup>3)</sup> Operating Voltage <sup>3)</sup>	$V_F$	–	5.8	7.0	V
Strahldivergenz (FWHM) <sup>3)</sup> Beam Divergence (FWHM) <sup>3)</sup>	$\theta_{\parallel} \times \theta_{\perp}$	4x18		11x25	deg
Polarisation <sup>3)</sup> Polarization <sup>3)</sup>	$P_{gr}$	20:1		–	
Modulationsfrequenz Modulation Frequency	$f$	–	>100	–	MHz

<sup>3)</sup> Standardbetriebsbedingungen beziehen sich auf  $P_{op}=80\text{mW}$  Ausgangsleistung.  
Standard operating conditions refer for to an output power of  $P_{op}=80\text{mW}$ .



## Anexo 5: Láser PLT5-488

### Preliminary Version 0.2

### PLT5 488

#### Ordering Information

Type:	Optical Output Power $P_{\text{opt}} (T_{\text{case}} = 25\text{ °C})$	Ordering Code
PLT5 488	60 mW	Q65111A5770

#### Maximum Ratings

Operation outside these conditions may damage the device. Operation at maximum ratings may influence lifetime.

Parameter	Symbol	Values		Unit
		min.	max.	
Operating Current	$I_F$		150	mA
Operating Temperature	$T_{\text{case}}$	-20	+60	°C
Storage Temperature	$T_{\text{stg}}$	-40	+85	°C
Reverse Current	$I_R$		20	mA
Soldering Temperature max. 10 sec.	$T_{\text{solder}}$		260	°C
Junction temperature	$T_j$		150	°C

#### Laser Characteristics ( $T_{\text{case}} = 25\text{ °C}$ )

Parameter	Symbol	Values			Unit
		min.	typ.	max.	
Emission Wavelength <sup>1)</sup>	$\lambda_{\text{peak}}$	486	488	490	nm
Spectral Width (FWHM) <sup>1)</sup>	$\Delta\lambda$	–	2	–	nm
Threshold Current	$I_{\text{th}}$	–	25	40	mA
Operating Current <sup>1)</sup>	$I_F$	–	85	100	mA
Operating Voltage <sup>1)</sup>	$V_F$	–	6.0	7.5	V
Beam Divergence (FWHM) <sup>1)</sup>	$\theta_{\text{H}} \times \theta_{\text{V}}$	4x 16	6x 23	8x 26	deg
Polarization <sup>1)</sup>	$P_{\text{gr}}$	–	100:1	–	
Modulation Frequency	$f$	–	>100	–	MHz
Thermal resistance (junction to case)	$R_{\text{th}}$	–	34	–	K/W
Monitor Current <sup>1) 2)</sup>	$I_m$	–	40	–	μA

<sup>1)</sup> Standard operating conditions refer to a continuous wave output power of  $P_{\text{opt}} = 60\text{ mW}$ .

<sup>2)</sup> Photo current refers to a reverse voltage of  $V_R = 5\text{ V}$ .

## Anexo 6: Láser PL-520

**PL 520 - PRELIMINARY**

Typ Type	Opt. Ausgangsleistung Optical Output Power $P_{op}$ (mW) ( $T_{Case} = 25^{\circ}\text{C}$ )	Bestellnummer Ordering Code
PL 520	50	Q65111A2445

### Grenzwerte

Betrieb außerhalb dieser Bedingungen kann das Bauteil schädigen

### Maximum Ratings

Operation outside these conditions may damage the device

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values		Einheit Unit
		min.	max.	
Betriebsstrom <sup>1)</sup> Operating Current <sup>1)</sup>	$I_F$	–	200	mA
Betriebstemperatur <sup>1)</sup> Operating Temperature <sup>1)</sup>	$T_{Case}$	- 20	+ 60	°C
Lagertemperatur Storage Temperature	$T_{stg}$	- 40	+ 85	°C
Sperrspannung Reverse Voltage	$V_R$	–	2	V
Löttemperatur max. 10 sec. Soldering Temperature max. 10 sec.	$T_{solder}$	–	260	°C
Sperrschichttemperatur <sup>1)</sup> Junction temperature <sup>1)</sup>	$T_J$	–	150	°C

<sup>1)</sup> Der Betrieb bei den Grenzwerten beeinflusst die Lebensdauer.  
Operation at maximum ratings may influence the life time.

**Laserkennwerte** ( $T_{\text{case}} = 25\text{ °C}$ )

**Laser Characteristics** ( $T_{\text{case}} = 25\text{ °C}$ )

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Values			Einheit Unit
		min.	typ.	max.	
Emissionswellenlänge <sup>1)</sup> Emission Wavelength <sup>1)</sup>	$\lambda_{\text{peak}}$	515	520	530	nm
Spektrale Breite (Halbwertsbreite) <sup>1)</sup> Spectral Width (FWHM) <sup>1)</sup>	$\Delta\lambda$	–	2	–	nm
Schwellstrom Threshold Current	$I_{\text{th}}$	–	45	75	mA
Betriebsstrom <sup>1)</sup> Operating Current <sup>1)</sup>	$I_{\text{F}}$	–	150	160	mA
Betriebsspannung <sup>1)</sup> Operating Voltage <sup>1)</sup>	$V_{\text{F}}$	–	7.0	8.0	V
Strahldivergenz (FWHM) <sup>1)</sup> Beam Divergence (FWHM) <sup>1)</sup>	$\theta_{\parallel} \times \theta_{\perp}$	4x16	7x22	11x25	deg
Polarisation <sup>1)</sup> Polarization <sup>1)</sup>	$P_{\text{gr}}$	20:1	–	–	
Modulationsfrequenz Modulation Frequency	$f$	–	>100	–	MHz
Thermischer Widerstand (pn-Übergang zu Gehäuse) Thermal resistance (junction to case)	$R_{\text{th}}$	–	38	–	K/W

<sup>1)</sup> Standardbetriebsbedingungen beziehen sich auf  $P_{\text{op}} = 50\text{mW}$  Ausgangsleistung im Dauerstrich-Betrieb.  
Standard operating conditions refer for to a continuous wave output power of  $P_{\text{op}} = 50\text{mW}$ .



## Anexo 7: Fotodiodo MTD5052W



Photo Diode

Product No: **MTD5052W**

### Peak Sensitivity Wavelength: 525nm

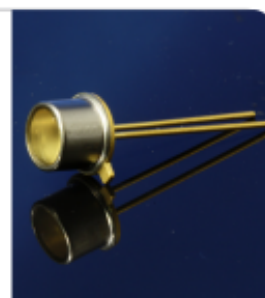
Visible Photo Diode enhanced for the Blue/Green Spectrum

#### FEATURES

- > Hermetically Sealed TO-18
- > Gold Plated Flat Top Can
- > High Reliability
- > Wide Angular Response

#### APPLICATIONS

- > Optical Analytics
- > Optical Switches
- > Light Barriers
- > Currency Validation



### Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)



ITEMS	SYMBOL	RATINGS	UNIT
Reverse Voltage	VR	5	V
Operating Temperature Range	Topr	-20 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	Tstg	-30 ~ +100	°C
Lead Soldering Temperature	Tls	260	°C

\*1: Time 5 Sec max, Position: Up to 3mm from the body.

### Electrical & Optical Characteristics (Ta = 25°C)

ITEMS	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Light Current	IL	*1	2.5	4.0	--	μA
Dark Current	ID	VR=5V	--	5	30	pA
Spectral Sensitivity	λ	--	--	410~580	--	nm
Peak Sensitivity Wavelength	λp	--	--	525	--	nm
Responsivity	S	*2	--	0.3	--	A/W
Angular Response	Θ	--	--	±55	--	deg

## Anexo 8: Fotodiodo S7797

### Features

- Clear plastic package with  $\phi 3$  mm lens
- High-speed response  
S7797: 500 MHz Typ. ( $V_R=2.5$  V)  
S5052: 500 MHz Typ. ( $V_R=5$  V)  
S8255: 200 MHz Typ. ( $V_R=5$  V)  
S5573: 80 MHz Typ. ( $V_R=5$  V)

### Applications

- Laser diode monitor in optical disk drive (high-speed APC)
- Spatial light transmission

### ■ General ratings / Absolute maximum ratings

Type No.	Package (mm)	Active area size (mm)	Effective active area (mm <sup>2</sup> )	Absolute maximum ratings			
				Reverse voltage $V_R$ Max. (V)	Power dissipation P (mW)	Operating temperature T <sub>opr</sub> (°C)	Storage temperature T <sub>stg</sub> (°C)
S7797	Plastic package with lens	$\phi 3.0$	7.0	20	50	-25 to +85	-40 to +100
S5052							
S8255							
S5573							

### ■ Electrical and optical characteristics (Typ. T<sub>a</sub>=25 °C, unless otherwise noted)

Type No.	Spectral response range $\lambda$  (nm)	Peak sensitivity wavelength $\lambda_p$  (nm)	Photo sensitivity S (A/W)				Short circuit current Isc 100 lx 2856 K ( $\mu$ A)	Dark current Id  (nA)		Temp. coefficient of Id Tcid (times/°C)	Cut-off frequency fc RL=50 $\Omega$ -3dB (MHz)	Terminal capacitance Ct f=1 MHz (pF)	NEP  (W/Hz <sup>1/2</sup> )
			$\lambda_p$	660 nm	780 nm	830 nm							
								Typ.	Max.				
S7797	320 to 1000	760	0.52	0.48	0.51	0.48	2.8	0.01 <sup>*1</sup>	0.3 <sup>*1</sup>	1.15	500 <sup>*1</sup>	6 <sup>*1</sup>	3.4 $\times 10^{-15}$ <sup>*1</sup>
S5052		800	0.46	0.4	0.45	0.45		0.02 <sup>*2</sup>	0.3 <sup>*2</sup>		500 <sup>*2</sup>	4 <sup>*2</sup>	5.5 $\times 10^{-15}$ <sup>*2</sup>
S8255	320 to 1060	900	0.53	0.4	0.48	0.5	4.0	0.01 <sup>*2</sup>	1 <sup>*2</sup>		200 <sup>*2</sup>	3 <sup>*2</sup>	3.4 $\times 10^{-15}$ <sup>*2</sup>
S5573							4.5	0.025 <sup>*2</sup>	1 <sup>*2</sup>		80 <sup>*2</sup>		5.3 $\times 10^{-15}$ <sup>*2</sup>

\*1:  $V_R=2.5$  V

\*2:  $V_R=5$  V

## Anexo 9: Balance de potencia sistema WDM

### Balance de potencia sistema WDM

Sensibilidad Ethernet (dBm)	-20
Sensibilidad audio (dBm)	-22,7
Sensibilidad video (dBm)	-22,5

Dispositivo 1 (dBm)	RX ETHERNET
Pot.Laser	17
Perd. Circuladores	4,4
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,1332
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	0
Perd.Acop.2x1	7,9
Perd.Conect.FBG	0,2
Pot. Entregada	-7,9032

Dispositivo 1 (dBm)	TX ETHERNET
Pot.Laser	17
Perd. Circuladores	2,2
Perd.Acop.3x1	0
Atenuación	0,1332
Perd.Reflex(80-20)	0
Perd.Trans(80-20)	0
Perd.Acop.2x1	7,9
Perd.Conect.FBG	0
Pot. Entregada	6,7668

Dispositivo 2 (dBm)	SUBWOOFER
Pot.Laser	17,78
Perd. Circuladores	6,6
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,504
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	0
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	0,4
Pot. Entregada	-5,944

Dispositivo 3 (dBm)	ALTAVOZ IZDO.TRASERO
Pot.Laser	17,78
Perd. Circuladores	8,8
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,534
Perd.Reflex(80-20)	7

Perd.Trans(80-20)	0,97
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	0,6
Pot. Entregada	-9,344

Dispositivo 4 (dBm)	ALTAVOZ IZDO.DELANTERO
Pot.Laser	17,78
Perd. Circuladores	11
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,65
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	1,94
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	0,8
Pot. Entregada	-12,83

Dispositivo 5 (dBm)	ALTAVOZ DCHO.DELANTERO
Pot.Laser	17,78
Perd. Circuladores	13,2
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,755
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	2,91
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1
Pot. Entregada	-16,305

Dispositivo 6 (dBm)	ALTAVOZ DCHO.TRASERO
Pot.Laser	17,78
Perd. Circuladores	15,4
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,866
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	3,88
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1,2
Pot. Entregada	-19,786

Dispositivo 7 (dBm)	PANTALLA DELANTERA
Pot.Laser	20,79
Perd. Circuladores	17,6
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,894
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	0
Perd.Acop.2x1	3,95

Perd.Conect.FBG	1,4
Pot. Entrega	-15,324

Dispositivo 8 (dBm)	PANTALLA DCHA.TRASERA
Pot.Laser	20,79
Perd. Circuladores	19,8
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	1,001
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	0,97
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1,6
Pot. Entrega	-18,801

Dispositivo 9 (dBm)	PANTALLA IZDA.TRASERA
Pot.Laser	20,79
Perd. Circuladores	22
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	1,106
Perd.Reflex(80-20)	7
Perd.Trans(80-20)	1,94
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1,8
Pot. Entrega	-22,276

Dispositivo 10 (dBm)	RX FINAL ANILLO ETHERNET
Pot.Laser	17
Perd. Circuladores	19,8
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	0,7716
Perd.Reflex(80-20)	0
Perd.Trans(80-20)	0,97
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1,8
Pot. Entrega	-15,5616

Dispositivo 11 (dBm)	RX FINAL ANILLO AUDIO
Pot.Laser	17,78
Perd. Circuladores	19,8
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	1,331
Perd.Reflex(80-20)	0
Perd.Trans(80-20)	4,85
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1,8
Pot. Entrega	-19,221

Dispositivo 12 (dBm)	RX FINAL ANILLO VIDEO
Pot.Laser	20,79
Perd. Circuladores	19,8
Perd.Acop.3x1	5,27
Atenuación	1,331
Perd.Reflex(80-20)	0
Perd.Trans(80-20)	2,91
Perd.Acop.2x1	3,95
Perd.Conect.FBG	1,8
Pot. Entregada	-14,271